

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y
SISTEMAS DE TELECOMUNICACIÓN



Caracterización Experimental del Centelleo Troposférico en Banda Ka

PROYECTO FIN DE GRADO

Eduardo García Merchán

Madrid, 2014



TELECOMUNICACIÓN

Campus Sur
POLITÉCNICA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y SISTEMAS DE TELECOMUNICACIÓN

PROYECTO FIN DE GRADO

TÍTULO:

AUTOR:

TITULACIÓN:

TUTOR (o Director en su caso):

.....

DEPARTAMENTO:

VºBº

Miembros del Tribunal Calificador:

PRESIDENTE:

VOCAL:

SECRETARIO:

Fecha de lectura:

Calificación:

El Secretario,

Resumen del proyecto

El presente Proyecto Fin de Grado tiene como objetivo el estudio y caracterización del centelleo troposférico en ausencia de lluvia en la banda Ka de un enlace Tierra-satélite. Para ello se dispondrá de un equipo receptor situado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación. Los datos son emitidos desde el satélite Eutelsat Hot Bird 13A a una frecuencia de 19,7 GHz.

La primera parte del proyecto comienza con las bases teóricas de los distintos fenómenos que afectan a la propagación de un enlace satélite, mencionando los modelos de predicción más importantes. Se ha dado más importancia al apartado perteneciente al centelleo troposférico por ser el tema tratado en este proyecto.

El estudio cuenta con datos del satélite durante 7 años comprendidos entre julio de 2006 a junio de 2013. Después del filtrado y el resto del tratamiento adecuado de los datos se han obtenido distintas distribuciones estadísticas que están relacionadas con el centelleo como la varianza.

Más tarde se ha comparado la varianza experimental con parámetros meteorológicos obtenidos desde distintas bases de datos. El objetivo de esto ha sido discernir cuál de estos factores afecta en mayor medida a la intensidad de centelleo. Para ello se ha realizado la correlación entre la varianza y varios parámetros meteorológicos: temperatura, humedad relativa, humedad absoluta, índice de refracción húmedo, presión... Además se han realizado medidas de nubosidad en los que se ha clasificado las muestras dependiendo del tipo de nube presente en el cielo.

A continuación se ha calculado la varianza mensual media y distribuciones acumuladas de ciertos modelos de predicción de centelleo, comparándolos gráficamente con las curvas experimentales. Estos modelos usan parámetros medidos en superficie por lo que se utilizarán algunos de los parámetros analizados en el capítulo anterior.

Por último se expondrán las conclusiones sacadas a lo largo de la realización del proyecto y las posibles líneas de investigación futuras.

Abstract

The present Project has as the principal aim the study and characterization of tropospheric scintillation in lack of rain in the band Ka of an Earth-satellite link. It is provided for a receptor equipment located in the ETSIT. The data are broadcasted from the Eutelsat Hot Bird 13A satellite at the frequency of 19,7 GHz.

The beginning of the project starts with the theoretical basis of the different phenomenons that affects to the propagation of a satellite link, naming the most important predictions models. The chapter referred to the scintillation has had more importance due to be the main topic in this project.

The study deals with satellite data during 7 years between July 2006 to June 2013. After the filter and others treatments of the data, it has been getting different statistics distributions related to scintillation like variance.

Later, the experimental variance has been compared with meteorological parameters obtained from different datasets. The purpose has been to decide which factor affects in a greater way to the scintillation intensity. For that it has been doing the correlation between variance and meteorological parameters: temperature, relative humidity, absolute humidity, air refractivity due to water vapour, pressure... Moreover, it has been doing cloudiness measurements in which the samples have been classified in order to the kind of cloud shown in the sky at that moment.

Then it has been calculated the monthly averaged variance and the prediction model for cumulative distributions which has been compared with the experimental results. That models uses surface data that they will be uses some meteorological parameters analyzed in previous chapters.

Finally it will be shown the conclusions obtained along the realization of the project and the possible ways of future research.

Glosario de términos

AEMET	Agencia Estatal de Meteorología
CAPE	<i>Convective Available Potential Energy</i>
COST	<i>European Cooperation in Science and Technology</i>
DA	<i>Distribución Acumulada</i>
DAH	<i>Modelo Dissanayake-Allnutt-Haidara</i>
DSD	<i>Drop Size density Distribution</i>
ETSIT	<i>Escuela Técnica Superior de ingenieros de Telecomunicación</i>
FMT	<i>Fade Mitigation Techniques</i>
FI	<i>Frecuencia Intermedia</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
HA	<i>Humedad Absoluta</i>
HR	<i>Humedad Relativa</i>
IWVC	<i>Integrated Water Vapour Content</i>
LCC	<i>Low Cloud Cover</i>
LNA	<i>Low Noise Amplifier</i>
MPM	<i>Milimetric wave Propagation Model</i>
MRR	<i>Micro Rain Radar</i>
NaN	<i>Not a Number</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
RF	<i>Radiofrecuencia</i>
SAM	<i>Simple Attenuation Model</i>
TCC	<i>Total Cloud Cover</i>
TCWV	<i>Total Column Water Vapour</i>
UIT	<i>Unión Internacional de Telecomunicaciones</i>
UIT-R	<i>Sector de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones</i>

UPM *Universidad Politécnica de Madrid*

XPD *Discriminación a la polarización cruzada*

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mi tutor D. Pedro García del Pino por su ayuda y su inestimable guía en la resolución de este proyecto.

Gracias a los amigos que he conocido en estos años, especialmente a Carlos, Cristian, Javier y José por todas las mañanas, tardes e incluso noches de laboratorio y por toda la ayuda en el transcurso de estos años. No quiero olvidarme de ninguno, pero tendréis que perdonarme por no poner el nombre de todos vosotros.

Gracias a mis amigos de toda la vida por la paciencia y por todos los buenos momentos pasados juntos que me han ayudado en los momentos que más lo necesitaba.

Gracias a mi familia, mis padres y mi hermana por estar siempre ahí y por todo el apoyo y ánimos que me han brindado durante la carrera. Quisiera agradecer a mi prima Gema por animarme a estudiar esta carrera llena de sacrificios y grandes recompensas.

Por último quiero agradecer a mis abuelos la alegría que sentían en mis éxitos, muchas veces mayor que mi propia felicidad y por los ánimos tras los tropiezos, encontrando así un gran punto de apoyo para poder levantarme. Un recuerdo especial a mi abuelo Mariano, que le hubiese encantado ver este último triunfo.

Índice

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	17
1.1. Objetivos del proyecto.....	17
1.2. Estructura del proyecto	18
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES	21
CAPÍTULO 3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	23
3.1. Influencia de la atmósfera en las señales radioeléctricas	23
3.2. Atenuación debida a gases atmosféricos	25
3.2.1. Modelos de predicción de atenuación por gases atmosféricos	26
3.3. Atenuación debida a nubes y niebla.....	26
3.3.1. Modelos de predicción de atenuación por nubes	26
3.4. Atenuación por arena y polvo	27
3.5. Atenuación por hidrometeoros	27
3.5.1. Atenuación específica de la lluvia	27
3.5.2. Métodos de predicción de atenuación por lluvia	29
3.6. Despolarización por hidrometeoros	30
3.7. Centelleo troposférico	31
3.7.1. Bases físicas.....	32
3.7.2. Función densidad de probabilidad de la amplitud	33
3.7.3. Caracterización espectral de los sucesos de centelleo	35
3.7.4. Correlación con parámetros meteorológicos	35
3.7.5. Modelos de predicción de centelleo.....	35
3.7.6. Centelleo en presencia de lluvia	39
3.7.7. Relación entre centelleo y atenuación	39
3.8. Combinación de efectos	40
3.8.1. Modelos de combinación de efectos	40
3.9. Dinámica de desvanecimientos	40
3.9.1. Definición de parámetros	41
3.9.2. Duración de los desvanecimientos	41
3.9.3. Duración del intervalo entre desvanecimientos.....	42
3.9.4. Pendiente de desvanecimiento	42
CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO Y EQUIPOS UTILIZADOS.....	45
4.1. Programa Eutelsat.....	45

4.1.1 Eutelsat HotBird 13A	46
4.2. Localización de la estación terrena.....	47
4.3. Equipo receptor	49
4.3.2. Unidad exterior	49
4.3.3. Unidad interior	51
4.4. Datos meteorológicos.....	52
4.4.1. Estación meteorológica de la ETSIT	52
4.4.2. ERA-Interim	55
4.4.3. GNSS.....	56
4.4.4. Datos AEMET.....	56
CAPÍTULO 5. PROCESADO DE DATOS.....	59
5.1. Procesado de datos de la baliza.....	59
5.1.1. Almacenamiento de los datos.....	59
5.1.2. Conversión a ficheros de MATLAB	60
5.1.3. Clasificación de los tramos.....	60
5.1.4. Detección de espurios.....	62
5.1.5. Cálculo de las distribuciones acumuladas.....	64
5.1.6. Análisis estadístico de las distribuciones acumuladas.....	64
5.1.7. Matriz diezminutal	64
5.2. Datos meteorológicos.....	65
5.2.1. Estación meteorológica de la ETSIT	65
5.2.2. ERA-Interim	65
5.2.3. GNSS.....	66
5.2.4. Datos AEMET.....	67
CAPÍTULO 6. RESULTADOS DE CENTELLEO.....	71
6.1 Ejemplo de un evento de centelleo	71
6.2. Varianza	71
6.2.1. Varianza mensual.....	72
6.2.2. Variabilidad anual.	73
6.3. Distribuciones acumuladas de varianza y amplitud	73
6.3.1. Distribución acumulada de varianza	74
6.3.2. Distribución acumulada de amplitud: atenuación y ganancia.....	75
6.4. Correlación con parámetros meteorológicos	79
6.4.1. Temperatura	80
6.4.2. Humedad Relativa, Humedad Absoluta, Nwet.	82

6.4.3. Presión atmosférica	85
6.4.4. Velocidad y dirección del viento	86
6.4.5. Vapor de agua integrado en columna vertical (TCWV, IWVC).....	88
6.4.6. Energía potencial disponible convectiva (CAPE).....	90
6.4.7. Nubosidad	92
6.5. Comparación con modelos de predicción de centelleo	97
6.5.1. Varianza media mensual	97
6.5.2. Distribuciones acumuladas de varianza	99
6.5.3. Distribución acumulada de amplitud	100
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES	103
7.1 Estudio de los datos recibidos	103
7.2 Correlación de parámetros meteorológicos.....	103
7.3 Modelos de predicción	104
7.4. Líneas de investigación futuras.....	104
BIBLIOGRAFIA	105

Capítulo 1. Introducción

El aumento del uso del espacio radioeléctrico ha impulsado la utilización de longitudes de ondas milimétricas en las comunicaciones radioeléctricas como la banda Ka (20-30 GHz). En estas frecuencias la atmósfera juega un papel muy importante, especialmente en las comunicaciones por satélite, por lo que una correcta caracterización del medio resulta fundamental. Además, debido a una mayor concentración de gases, es la troposfera la capa terrestre que resulta más interesante para su estudio, siendo las restantes capas de menor relevancia en cuanto a la propagación de las señales.

Los efectos que ejerce la atmósfera sobre las ondas milimétricas suelen ser negativos, los más conocidos la atenuación por lluvia y gases. Sin embargo, existen otros fenómenos que resultan problemáticos para los equipos, como el centelleo troposférico. Para evitar en la medida de lo posible estos efectos es posible diseñar técnicas de mitigación usadas por los equipos de transmisión y recepción. Estas técnicas adaptan el canal minimizando los efectos troposféricos ayudándose por ejemplo de modulaciones adaptativas o técnicas FMT (Fade Mitigation Techniques).

La correcta adaptación del canal radio necesita una continua medición de parámetros atmosféricos. Partiendo de estas medidas se obtienen modelos de predicción que estiman varios efectos causados por estos fenómenos, validando los modelos ya existentes o mejorando y minimizando los errores causados por estos.

Los receptores satelitales sirven para medir las señales de las balizas emitidas por los satélites, usadas para funciones como orientación de las antenas y otras tareas de mantenimiento. Debido a que estas balizas emiten con una frecuencia e intensidades constantes, resultan ideales para el estudio de su propagación, ya que las posibles variaciones de la señal pueden considerarse causadas por efecto de la atmósfera.

1.1. Objetivos del proyecto

Las señales de radiocomunicación afectadas por el centelleo troposférico sufren variaciones muy rápidas en su intensidad y fase, ocasionando problemas al correcto funcionamiento de los sistemas. El objetivo principal del proyecto es comparar los distintos modelos de predicción de centelleo y determinar cuál de ellos se ajusta mejor con los datos experimentales obtenidos. Las conclusiones obtenidas ayudarán a mejorar la posible modificación de estos modelos en futuros estudios.

Para ello se dispone de medidas de una señal baliza en banda Ka emitida por el satélite Eutelsat Hot Bird 13A.

El equipo receptor se encuentra en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación (ETSIT) de la Universidad Politécnica de Madrid. Los datos experimentales comprenden una duración de 7 años, desde julio de 2006 a junio de 2013, fecha en que se dejó de emitir con este satélite. Así cada año de estudio está comprendido desde julio de un año hasta julio del año siguiente.

Para las medidas de parámetros meteorológicos se han usado las medidas de la estación automática y medidas sacadas de distintas bases de datos (ERA-Interim, SYNOP, GNSS). La estación automática emplazada a escasos metros del receptor satelital se compone de un pluviómetro, un disdrómetro y un radar meteorológico.

1.2. Estructura del proyecto

Los capítulos que forman parte de este proyecto pueden dividirse en dos bloques diferenciados:

- El primer bloque tras la introducción que incluye los apartados 3 y 4, estudiará los principales fundamentos teóricos que afectan al trayecto de una señal de un enlace tierra-satélite, así como el equipamiento utilizado para la realización del experimento.
- El segundo bloque que incluye los capítulos del 5, 6 y 7 explicará la parte práctica del proyecto. En primer lugar se describirá el análisis de los datos para finalmente representar los resultados. Al final se expondrán las conclusiones obtenidas.

El proyecto se organiza en 7 capítulos, de la siguiente forma:

- El primer capítulo presenta el Proyecto, dando una idea general del tema a tratar, el centelleo troposférico seco. En la introducción también se expone la estructuración del Proyecto y los contenidos principales de sus capítulos.
- El capítulo 2 expone el contexto en el que se desarrolla el experimento, los experimentos previos a la fecha para tratar de caracterizar la propagación de la señal en un trayecto inclinado.
- En el tercer capítulo se describen los fundamentos teóricos de los fenómenos que afectan a un enlace Tierra-satélite. Este capítulo cuenta con 9 apartados, cada uno perteneciente a un fenómeno distinto, poniendo especial énfasis en el apartado perteneciente al centelleo troposférico por ser el tema que cubre este proyecto.
- El capítulo 4 describe el enlace satélite, así como el equipamiento específico empleado en la realización del experimento. En primer lugar se expone las características técnicas del satélite Eutelsat Hot Bird 13A. Seguidamente se describe el emplazamiento de la estación terrena y los distintos equipos por los que está formado. También se mencionan las distintas bases de datos, explicando los parámetros recogidos en cada una y su emplazamiento.
- El capítulo 5 describe el procedimiento para el tratamiento de los datos obtenidos por el equipo receptor y de las distintas bases de datos.

- En el capítulo 6 se muestran los resultados para el centelleo para los 7 años de estudio. Primero se mostrará un evento de centelleo de ejemplo, para posteriormente presentar la varianza y las distribuciones acumuladas experimentales. A continuación se presentan las correlaciones de la varianza con los parámetros meteorológicos. Por último se comparan los datos experimentales con los diferentes modelos de predicción.
- En el capítulo 7 se resumen las principales conclusiones sacadas a lo largo de la realización del presente proyecto y se exponen las posibles líneas de investigación futuras para continuar en la investigación y caracterización del centelleo.

Capítulo 2. Antecedentes

La necesidad de un mayor aprovechamiento del espectro radioeléctrico surgió en los años 70, debido en su mayor parte al desarrollo de las telecomunicaciones por satélite. Esto dio origen a la utilización de longitudes de ondas centimétricas y la aparición de efectos de atenuación por lluvia y gases que anteriormente pasaban desapercibidos.

Surgió entonces la necesidad de tomar medidas de pluviometría y relacionarlas con datos de experimentos de propagación. Los primeros experimentos se llevaron a cabo en Japón en los años 70 y 80 con los satélites ETS-II y ECS y en los Estados Unidos con el ATS-5 y ATS-6. En Europa, los satélites OTS y Sirio permitieron realizar medidas en las bandas Ku y Ka. Con el fin de valorar el impacto de la precipitación en la propagación de ondas, esta actividad prosiguió y se establecieron las primeras bases de datos meteorológicas y los primeros modelos de atenuación, aunque bastante imprecisos.

Con el paso de los años se fue progresando en la precisión de los modelos de predicción, debido al aumento de los experimentos y con ello al aumento de datos recogidos. En Europa, la mayoría de los experimentos se realizaron con el satélite Olympus dando como resultado varios proyectos COST (European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research) como el COST 255, *Radiowave Propagation Modelling for new SatCom Services at Ku-band and above*. Actualmente está en activo el COST 280, *Propagation impairment Mitigation for Millimetre Wave Radio System*.

A partir de los años 90 fueron surgiendo nuevas aplicaciones que necesitaban más ancho de banda, hacer necesarias nuevas especificaciones a la hora de planificar un enlace. Debido a ello se amplió la realización de los experimentos a las bandas Q/V (40-50 GHz) para dar paso a los futuros avances tecnológicos.

Paralelamente se han realizado varios experimentos con el fin de caracterizar el centelleo y calcular nuevos modelos de predicción que estimen la varianza mensual media. Algunos de estos autores son Frank Silvio Marzano [34], Ifiok E. Otung [32], G. Ortgies [33]. En sus estudios se usan parámetros medidos en superficie para predecir la intensidad de centelleo.

En el futuro, se prevé que debido al aumento del ancho de banda para dar cabida a los usuarios consumidores de los nuevos servicios se utilicen frecuencias cada vez más elevadas. Esto implicará una reducción en el tamaño de las antenas pero también tendrá la dificultad de enfrentarse a una mayor atenuación.

Capítulo 3. Fundamentos teóricos

El objetivo de este capítulo es mostrar las características de un canal radio y los parámetros meteorológicos que afectan a las comunicaciones vía satélite. No se pretende un estudio detallado de todos los efectos ocasionados en la propagación, por lo que se facilitará la bibliografía necesaria para su profundización [1][2][3]. También se pueden consultar una Tesis Doctoral y varios Proyectos Fin de Carrera anteriores realizados en la UPM [4][5][6][7]. En los apartados siguientes se describirán brevemente los fenómenos más importantes que afectan a la señal, poniendo más énfasis en el centelleo troposférico.

El capítulo está estructurado en varios apartados, siendo el primero de ellos una descripción de la atmósfera terrestre. A continuación se detallarán los fenómenos más importantes que afectan a una señal radioeléctrica, que son:

- Atenuación por gases
- Atenuación por nubes
- Atenuación por arena y polvo
- Atenuación por hidrometeoros
- Despolarización por hidrometeoros
- Centelleo troposférico

Se hará hincapié en el centelleo troposférico, en especial en el centelleo en ausencia de lluvia o centelleo seco. En este apartado se detallarán las causas que lo provocan y se expondrán varios modelos de predicción.

A continuación se mostrará el procedimiento de combinación de los anteriores efectos. Para combinarlos no se trata de sumar las distribuciones de cada uno por separado, ya que poseen relaciones mutuas que hay que tener en cuenta.

Tras este apartado se mostrarán como los sistemas de telecomunicaciones hacen uso de la diversidad espacial para asegurar la disponibilidad de la señal.

Para finalizar se expone el estudio de la dinámica de los desvanecimientos, que puede resultar muy útil en la planificación de un enlace de telecomunicaciones.

3.1. Influencia de la atmósfera en las señales radioeléctricas

La atmósfera es la capa gaseosa que envuelve a nuestro planeta. Tiene un grosor de unos 500 km, aunque debido a la gravedad la mayor parte de los gases se encuentran en una franja entre 0 y 16 km por encima de la superficie terrestre.

La atmósfera tiene cuatro capas cuyas características son muy diferentes unas de otras:

- La capa superior y la más gruesa es la exosfera (600/800 - 2.000/10.000 km). Es la capa que forma frontera con el espacio y donde los átomos escapan al exterior. Su límite superior se encuentra a unos 10.000 km y está relativamente indefinida.
- La segunda capa más externa es la termosfera o ionosfera (de 69/90 a los 600/800 km). La temperatura aumenta con la altitud, así como con la intensidad de radiación solar, pudiendo llegar hasta los 1500 °C.
- La mesosfera es una capa de unos 30 km de espesor. Apenas contiene ozono ni vapor de agua, pero sí cúmulos de hielo y polvo. Es la zona más fría, la temperatura va disminuyendo a medida que se aumenta la altura, hasta llegar a unos -80 °C. La baja densidad del aire determina la formación de turbulencias y ondas atmosféricas que actúan a escalas espaciales y temporales muy grandes.
- La estratosfera comprende desde los 9 o 18 km hasta los 50 km de altitud. En ella se localiza la capa de Ozono, en la que se concentra el 90% de este gas en la atmósfera. Esta capa filtra las radiaciones provenientes del Sol, y debido a esta absorción la temperatura aumenta en la parte superior de la estratosfera.
- La troposfera es la capa que contacta con la superficie terrestre. Es la capa más fina, con un grosor de unos 18 km. Contiene un 80% del total de gases atmosféricos y casi todo el vapor de agua. La temperatura desciende con la altitud a una tasa típica de 0,65 °C por cada 100 m.

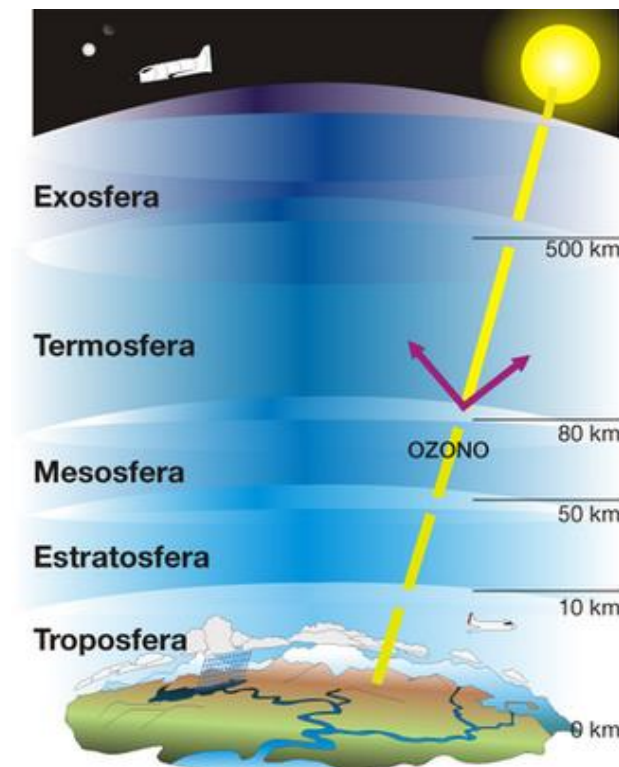


Ilustración 1. Capas de la atmósfera

Es en la troposfera donde se producen la mayoría de los fenómenos meteorológicos que afectan a la propagación, incluido el centelleo, y por lo tanto a lo largo de este proyecto nos centraremos únicamente en esta capa.

3.2. Atenuación debida a gases atmosféricos

La absorción atmosférica de las ondas milimétricas se debe a las resonancias moleculares de las moléculas de oxígeno y vapor de agua. Por debajo de los 10 GHz la absorción producida por los gases puede considerarse despreciable, sin embargo al aumentar en frecuencia generalmente se producirá una mayor atenuación [8].

Aunque la tendencia de la absorción debida a gases aumenta con la frecuencia, presenta unos picos en unos rangos de frecuencias concretas. El oxígeno tiene una línea de absorción a 118,7 GHz y varias líneas de absorción entre 50 y 70 GHz. El vapor de agua tiene tres líneas de absorción por debajo de 350 GHz, a las frecuencias de 22,3, 183,3 y 323,8 GHz. En la parte baja de la atmósfera la serie de líneas del oxígeno se expande debido a la presión y forma un único espectro de absorción centrado en 60 GHz.

La atenuación específica del oxígeno y el vapor de agua aparece reflejada en la siguiente figura. El efecto de atenuación de las distintas líneas se aprecia con claridad en torno a las frecuencias previamente comentadas.

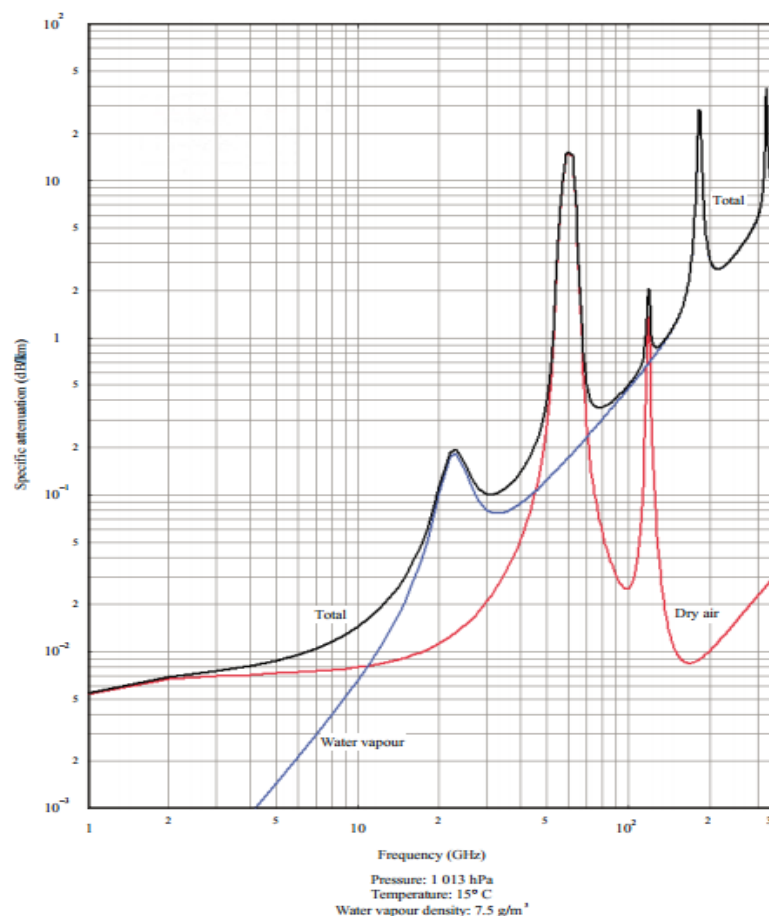


Ilustración 2. Atenuación específica por gases

Otros gases presentes en la atmósfera (NO , NO_2 , SO_2 ...) pueden atenuar significativamente la señal por encima de 70 GHz. Sin embargo para frecuencias inferiores son despreciables en comparación con la atenuación producida por el oxígeno y el vapor de agua.

La contribución del oxígeno a la absorción atmosférica suele considerarse constante debido a la uniformidad de la concentración de este gas sobre la atmósfera, aunque sufre pequeñas variaciones con la temperatura. La atenuación provocada por el vapor de agua es más variable, debido a que los cambios de concentración son mayores.

3.2.1. Modelos de predicción de atenuación por gases atmosféricos

Existen varios modelos de estimación de valores de atenuación por gases, se destaca el de la UIT-R, que recoge la Recomendación P.676-9 [9] y se basa en el modelo de Liebe MPM (Milimetre Wave Propagation). Es un método línea a línea, en el que se suman las contribuciones de todas las líneas de resonancia del oxígeno y el vapor de agua, y en combinación se calcula la atenuación específica total. Este modelo es válido hasta los 1000 GHz y contiene un método aproximado de cálculos más sencillos para frecuencias inferiores a 350 GHz. Necesita como datos de entrada los parámetros climáticos que pueden ser sacados de mapas climáticos del UIT-R.

El modelo de Liebe desarrolla de forma precisa cálculos de la refractividad del aire para frecuencias comprendidas entre 1 y 1000 GHz, pero requiere mucho gasto computacional y datos verticales de parámetros meteorológicos, cuya precisión tiene que ser cuidadosamente comprobada.

3.3. Atenuación debida a nubes y niebla

Las nubes y la niebla están constituidas por pequeñas partículas de agua, con diámetros que oscilan entre 10 y 100 μm . Las nubes pueden dar lugar a valores significativos de atenuación en frecuencias milimétricas, pudiendo ser la degradación predominante en sistemas de baja disponibilidad. Por otro lado, las nubes formadas por partículas de hielo no afectan significativamente a la atenuación de la señal, siendo estas las que se encuentran a mayor distancia de la superficie, aunque si pueden causar despolarización.

En cuanto a la niebla, está compuesta por pequeñas partículas de aire saturado de vapor de agua que parte del total ha precipitado en forma de pequeñas gotas. La atenuación por niebla sólo es significativa en frecuencias superiores a 100 GHz. Su atenuación específica se calcula en función del agua líquida.

3.3.1. Modelos de predicción de atenuación por nubes

La base para la predicción de la atenuación por nubes es la teoría de dispersión para partículas aisladas, en particular la aproximación de Rayleigh para partículas inferiores a 100 μm . Sin embargo su aplicación no resulta directa debido a la complejidad de física del modelado de nubes y la escasez de datos precisos.

Existe otro modelo de predicción recogido en la Recomendación 840-3 de la UIT [11]. Este procedimiento es el preferido a la hora de realizar el cálculo de atenuación y se parte del contenido de agua líquida en una columna vertical. Se proporciona un mapa global de contenido de agua líquida y la atenuación específica se calcula a partir de un cálculo matemático basado en la dispersión de Rayleigh.

El modelo DAH [12] obtiene el contenido de agua líquida a partir de estadísticas locales de aparición de diversos tipos de nubes, a las que se les asigna unas determinadas propiedades (extensión horizontal y vertical, densidad de agua líquida).

El modelo de Salonen-Uppala [13] utiliza perfiles verticales de parámetros meteorológicos registrados por sondeos para detectar nubes y calcular su contenido de agua líquida.

3.4. Atenuación por arena y polvo

La arena y el polvo atenúan las ondas radioeléctricas mediante los mismos mecanismos que las precipitaciones por hidrometeoros. Las tempestades de arena y polvo se componen de pequeñas partículas de arena en suspensión con diámetros aproximados de 0,05 cm. En condiciones límite estas nubes pueden cubrir un área de varios kilómetros de largo y llegar a una altura de 1000 m por encima de la superficie.

Las características de atenuación pueden evaluarse en longitudes de onda centimétricas usando la teoría de dispersión de Rayleigh y la teoría de Mie en longitudes de onda más cortas. La concentración de partículas se puede relacionar de forma empírica con la visibilidad óptica siendo inversamente proporcional a la atenuación. También los valores de atenuación guardan una relación con la humedad. Para una nube con partículas de tamaño promedio, la atenuación a 14 GHz es de 0,03 dB/km para partículas secas y 0,65 dB/km para partículas húmedas, teniendo una visibilidad de 100 m.

En cualquier caso la atenuación únicamente es importante para altas concentraciones de partículas y/o elevada humedad.

3.5. Atenuación por hidrometeoros

La atenuación por lluvia es una de las limitaciones más importantes en el desarrollo de enlaces de comunicación por satélite, causando grandes variaciones en la potencia de la señal recibida. La atenuación por lluvia empieza a tener impacto a frecuencias en torno a los 8 GHz, aumentando notablemente hasta los 200 GHz. Por encima de esta frecuencia, la atenuación específica disminuye ligeramente.

3.5.1. Atenuación específica de la lluvia

La lluvia se compone de un conjunto de gotas de diferentes tamaños, formas y temperaturas. Para el cálculo de la atenuación específica suelen considerarse estas cuatro propiedades de las gotas de lluvia:

- Distribución del tamaño.
- Forma y orientación de la gota de lluvia

- Velocidad terminal
- Temperatura

En la Recomendación UIT-R 838-3[28] se recoge la información necesaria para el cálculo de la atenuación específica. Los cálculos necesarios hacen uso de los cuatro parámetros anteriormente mencionados. A su vez este documento ofrece unas gráficas para facilitar la consulta, evitando así el cálculo de las primeras ecuaciones de la recomendación.

A continuación se hará una descripción general de estos cuatro parámetros y su efecto.

Distribución del tamaño de las gotas

Aunque los tamaños formas y orientaciones de las gotas pueden variar respecto a las demás, puede suponerse que la distribución es relativamente estable, variando con la intensidad de la lluvia.

La distribución de Laws y Parson [14] se basa en mediciones para intensidades de lluvia de hasta 50 mm/h, aunque puede extrapolarse para intensidades superiores. Posteriormente Marshall y Palmer sugirieron una distribución del tamaño representada por una exponencial negativa. La distribución de Joss [15] clasifica el tamaño de las gotas dependiendo de 3 tipos de lluvia: convectiva, estratiforme y llovizna.

Actualmente se han propuesto modelos basados en distribuciones log-normal, gamma o Weibull, sin embargo, las medidas de distribuciones de gotas con tamaños por encima de 0,5 mm confirman el modelo de Laws y Parson. Por otro lado, para gotas de tamaño muy pequeño existe una incertidumbre en su distribución debido a su pequeña masa y baja velocidad de caída.

Forma y orientación de los hidrometeoros

Al precipitar, las gotas de lluvia asumen una forma esferoidal aplastada, debido al efecto de la gravedad y a la tensión superficial del agua. Suelen mantener una simetría vertical en ausencia de viento.

El modelo más utilizado para caracterizar su tamaño procede de los experimentos realizados por Pruppacher y Pitter [16] que determinan su forma en función del tamaño que varía entre 100 μm y 3,5 mm de radio. No es frecuente ver gotas de mayor tamaño ya que estas son más inestables y suelen fragmentarse durante su caída.

Para caracterizar la orientación de las gotas se utiliza el modelo de Brussard [17] que tiene en cuenta las fuerzas gravitacionales y aerodinámicas.

Velocidad terminal

Para determinar la velocidad de caída de las gotas de lluvia se suele utilizar el modelo de Gunn y Kinzer, que relaciona la velocidad terminal de las gotas de lluvia con su tamaño con aire en calma. Según este modelo la velocidad máxima que puede llegar a conseguir una gota es de 9 m/s en 2,5 mm de radio.

Temperatura

La temperatura de una gota de lluvia es aproximadamente la temperatura del aire circundante. Pueden existir pequeñas gotas de lluvia por debajo de los 0 grados, especialmente en regiones con nieblas muy frías.

Las variaciones de temperatura de las gotas con el valor supuesto solo son relevantes para frecuencias inferiores a 20 GHz, pudiendo ser causa de divergencias de hasta un 20% en la atenuación específica.

3.5.2. Métodos de predicción de atenuación por lluvia

La atenuación producida por la lluvia en un trayecto puede calcularse integrando la atenuación específica en toda su longitud si se conoce la variación de la intensidad a lo largo del trayecto. Sin embargo, normalmente se carece de esta información. Por el contrario se han propuesto varios modelos de predicción a partir de mediciones de la intensidad de precipitación sobre el propio trayecto o en su alrededor. Estos modelos se pueden separar en dos categorías:

- Modelos físicos. Intentan definir la física del fenómeno y modelar la estructura horizontal y vertical de la lluvia. Suelen basarse en medidas de radares meteorológicos.
- Modelos semiempíricos. Se obtienen mediante el ajuste de medidas experimentales de atenuación en varios emplazamientos, frecuencias y ángulos de elevación. Requieren la utilización de parámetros estadísticos como la longitud de trayecto efectiva o los coeficientes de reducción horizontal y vertical.

A priori los modelos físicos son los más adecuados para la predicción de la atenuación, suele ser escasa la información acerca de muchos de los parámetros necesarios para obtener parámetros fiables. Por esta razón, los modelos semiempíricos se han utilizado más hasta ahora y generalmente, han obtenido mejores resultados.

A continuación se muestra una visión general de algunos modelos de predicción:

Modelo de la UIT Recomendación P.618-11

Este modelo [19] es aplicable para un rango de frecuencias entre 4 y 35 GHz. Se inspira en el modelo propuesto por Dissanayake y se basa en una distribución log-normal para la intensidad de lluvia y atenuación. Tiene en consideración las heterogeneidades de la lluvia en la dirección horizontal y vertical por medio de coeficientes de corrección. Toma como dato de entrada el valor de la intensidad de lluvia para una tasa de lluvia del 0,01% del tiempo en un año medio.

Modelo EXCELL

Es un modelo físico que define el proceso de precipitación mediante una población de células de lluvia [20]. Estas células presentan simetría circular y la intensidad de lluvia decrece de manera exponencial con respecto al valor máximo. Los valores de la intensidad máxima se calculan a partir de expresiones empíricas tomando como datos de entrada los valores predichos por la UIT.

Modelo SAM (Simple Attenuation Model)

Es un modelo semiempírico basado en un perfil de intensidades de lluvia exponencial[21]. Emplea su distribución de intensidad de lluvia a lo largo del trayecto dependiendo de si el valor de la intensidad de lluvia es mayor o menor a 10 mm/h. Dependiendo de este valor se proporcionan dos expresiones de atenuación, siendo la inferior uniforme y la superior exponencial.

3.6. Despolarización por hidrometeoros

Haciendo uso de polarizaciones ortogonales pueden transmitirse dos canales simultáneamente usando la misma frecuencia. De este modo se duplica la eficiencia espectral. Los canales polarizados ortogonalmente están en teoría aislados, aunque en la práctica sufren un cierto grado de interferencia entre ellos. Esto se debe a un rendimiento imperfecto de las antenas de los satélites y estaciones terrenas y a efectos de despolarización en el trayecto de propagación.

La despolarización se genera tanto en la ionosfera como en la troposfera. Las tormentas y precipitaciones son la causa más común de despolarización. De acuerdo con la mayoría de modelos de predicción debido a lluvia, el medio tiene dos planos principales y los parámetros que lo caracterizan son el ángulo de inclinación de estos planos y la atenuación y fase diferencial entre los dos planos.

La despolarización por precipitación se debe a los desplazamientos diferenciales de fase y atenuación inducidos entre las componentes ortogonales de la onda incidente. Las ondas de polarización ortogonal que atraviesan un medio que provoca fases diferenciales están despolarizadas, pero mantienen el carácter ortogonal. Sin embargo, si el medio provoca además la atenuación diferencial, se pierde ortogonalidad.

Existe también una despolarización debida a cristales de hielo, situados habitualmente por encima de la región de lluvia y en nubes de hielo sin precipitar.

En los sistemas que funcionan con una sola polarización el efecto de la despolarización únicamente causa una pequeña atenuación. Sin embargo en sistemas con polarizaciones ortogonales, la despolarización se traduce en una interferencia procedente de la polarización cruzada.

La despolarización depende de varios factores:

- Frecuencia del enlace.
- Geometría del trayecto: ángulo de elevación, ángulo de inclinación de la polarización...

- Factores climáticos.
- Sensibilidad del sistema ante interferencia por polarización cruzada.

El parámetro que se mide habitualmente en los experimentos es la discriminación de polarización cruzada (XPD), definida como la relación entre la potencia copolar recibida en un canal y la potencia cruzada detectada en el canal ortogonal, procedentes ambas de la misma señal transmitida. El modelo de despolarización de la UIT establece una relación entre la XPD y la atenuación excedida para un determinado porcentaje de tiempo en el mismo trayecto de propagación. El modelo se considera válido hasta 35 GHz y ángulos de elevación por debajo de 60°.

3.7. Centelleo troposférico

El centelleo troposférico es el fenómeno por el cual la onda sufre rápidas fluctuaciones de la amplitud debido a pequeñas variaciones del índice de refracción en la atmósfera. Estas variaciones del índice de refracción dependen principalmente de la humedad y temperatura del ambiente y presión atmosférica. De todas ellas la causa más predominante del centelleo en un enlace por satélite es la humedad, resultando en variaciones aleatorias de la amplitud y fase de la señal.

Los desvanecimientos por centelleo pueden suponer un problema importante en las comunicaciones por satélite con pequeño margen y con ángulo de inclinación bajos, en los que la disponibilidad depende de los efectos de la atmósfera en ausencia de lluvia. Además las rápidas fluctuaciones pueden ocasionar graves problemas en los sistemas de seguimiento de antena, en el control de potencia ascendente y en la implantación de técnicas para mitigación de desvanecimiento.

La intensidad del centelleo aumenta con la frecuencia y al disminuir el ángulo de elevación. También se ha comprobado experimentalmente que posee una dependencia diurna y estacional ya que se observan correlaciones con parámetros meteorológicos que varían con el tiempo. En climas templados, las intensidades más elevadas son más frecuentes en verano alrededor de mediodía, debido a la mayor probabilidad de formación de fenómenos convectivos.

Debido a la dificultad que tiene la medición de las variables meteorológicas en altitud, el centelleo se suele relacionar con parámetros meteorológicos medidos en superficie. Estos son más sencillos de medir pero tienen menor correlación que los fenómenos turbulentos donde se origina el centelleo (típicamente en alturas superiores a 1000 m). Generalmente los fenómenos que generan una mayor intensidad de centelleo son la temperatura, la humedad absoluta o relativa y la presencia de nubosidad.

El centelleo puede caracterizarse mediante diversos parámetros, aunque los más utilizados son los siguientes:

- χ_- , desviación de la amplitud negativa (atenuación con respecto al valor medio).
- χ_+ , desviación de la amplitud positiva (ganancia) con respecto al valor medio.

- σ , σ^2 , desviación típica y varianza de la amplitud de centelleo. Calculada en periodos de un minuto.

Para todos los parámetros interesa conocer su distribución acumulada mensual o anual, es decir, cuál es el valor excedido para cada porcentaje de tiempo en un mes o un año. Además, para la desviación típica es muy importante el valor medio mensual ya que es muy utilizado por los modelos clásicos de centelleo.

3.7.1. Bases físicas

La base teórica del centelleo troposférico es el modelo de dinámica de fluidos para las fluctuaciones de velocidad en un medio turbulento, propuesto por Kolmogorov y desarrollado por Tatarski [22]. Según este modelo se diferencian dos escalas de turbulencia:

Una primera escala, llamada escala externa o escala de inyección de la energía turbulenta, tiene un tamaño L_0 del orden de decenas de metros a varios kilómetros. En ella la energía turbulenta procede de movimientos de aire en diferentes escalas.

La segunda escala, llamada escala interna o escala de disipación, caracterizada por un tamaño mucho menor l_0 del orden de milímetros. La energía se transmite en movimientos pequeños formando una cascada que finaliza cuando la energía cinética turbulenta se disipa en forma de calor a causa de la viscosidad del medio.

Dentro de la turbulencia, la extensión espacial de las variaciones de velocidad se modela a través de una función de estructura $F_v(r)$, definida como:

$$F_v(r) = \overline{[v(r) - v(0)]^2} \quad (1)$$

Donde $v(0)$ es la velocidad del fluido en el punto asignado como origen de coordenadas y $v(r)$ es la velocidad del fluido situado a una distancia r del origen. En la atmósfera las fluctuaciones de temperatura, presión y humedad, da lugar a variaciones en el índice de refracción. Aplicando las fluctuaciones del índice de refracción en vez de las fluctuaciones de velocidad Tatarski define *la función de estructura del índice de refracción* $F_n(r)$:

$$F_n(r) = \begin{cases} C_n^2 \cdot r^{2/3} & l_0 \ll r \ll L_0 \\ C_n^2 \cdot l_0^{2/3} \cdot r^2 & r \ll l_0 \end{cases} \quad (2)$$

Donde C_n^2 es la constante de estructura, una medida de la magnitud de las fluctuaciones del índice de refracción. Se trata de un parámetro dependiente de la altura y para un trayecto inclinado debe tenerse en cuenta su variación a lo largo del trayecto.

Utilizando la representación espectral de la función estructura, Tatarski derivó la siguiente expresión para el espectro tridimensional de las fluctuaciones del índice de refracción:

$$F_n = 0.033 \cdot C_n^2 \cdot (2\pi/l)^{-11/3} \quad (3)$$

Donde l indica el tamaño de las fluctuaciones.

Para un trayecto no homogéneo, como el que atraviesa la señal en un enlace Tierra-Satélite, la varianza σ^2 de la variación de la amplitud viene dada:

$$\sigma^2 = 42.25 \frac{k^{7/6}}{(\sin \varepsilon)^{11/6}} \cdot \int_0^L C_n^2(r) \cdot r^{5/6} dr \quad [\text{dB}^2] \quad (4)$$

Donde r es la distancia del trayecto desde el origen de coordenadas (m) y L es la longitud total del trayecto (m). La expresión anterior caracteriza la intensidad del centelleo para un receptor puntual. En situaciones reales se necesita corregir la ecuación para tener en cuenta que al aumentar el diámetro de la antena disminuye la correlación de las fluctuaciones de la onda incidente. Esto se realiza mediante un factor de suavizado que según Haddon y Vilar [23] tiene la siguiente expresión:

$$g(x) = \sqrt{3.86(x^2 + 1)^{11/12} \cdot \sin\left(\frac{11}{6} \cdot \arctan \frac{1}{x}\right) - 7.08x^{5/6}} \quad (5)$$

Donde $x = 0.0584 \cdot k \cdot D_e^2 / z$ es una medida entre el diámetro eficaz de la antena D_e y la distancia desde el receptor hasta la capa turbulenta z :

$$L = 2h / \left(\sqrt{\sin^2 \varepsilon + 2h/a_e} + \sin \varepsilon \right) \quad (6)$$

Donde h es la altura de la capa turbulenta, ε es el ángulo de elevación y a_e es el radio efectivo de la Tierra (aproximadamente $8.5 \cdot 10^6$ m).

3.7.2. Función densidad de probabilidad de la amplitud

Según el modelo de Moulosley y Vilar[24] la señal recibida es la resultante de numerosos términos incorrelados, por lo que se sigue del teorema del límite central que el centelleo se distribuye de manera normal con media cero y varianza σ^2 . Esto es válido para periodos de tiempo cortos (entre 10 minutos y una hora). Para periodos de tiempos mayores, la varianza se trata en sí misma de una variable aleatoria, porque la constante de estructura C_n^2 varía lentamente con el tiempo.

Por lo tanto la función de densidad de probabilidad de la amplitud χ (dB), es la composición de dos distribuciones, una de corto plazo y otra de largo plazo:

$$p(\chi) = \int_0^\infty p(\sigma_\chi) p(\chi|\sigma_\chi) d\sigma_\chi \quad (7)$$

Donde $p(\sigma_\chi)$ es la distribución a largo plazo de la amplitud y $p(\chi|\sigma_\chi)$ la distribución a corto plazo, suponiendo una desviación típica de centelleo σ_χ constante.

3.7.2.1. Distribución a corto plazo de la amplitud

Se han propuesto dos distribuciones a corto plazo de la amplitud, mediante distribución gaussiana y mediante una distribución Rice-Nakagami:

- Distribución gaussiana.

Mousley y Vilar[24] encontraron que la distribución a corto plazo tiene una función de densidad de probabilidad gaussiana alrededor del nivel medio. Es decir, las desviaciones positivas y negativas se distribuyen de manera simétrica alrededor del nivel medio:

$$p(\chi|\sigma_\chi) = \frac{1}{\sigma_\chi\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\chi^2}{2\sigma_\chi^2}\right) \quad (8)$$

Por otro lado, Banjo y Vilar [25] encontraron que para mayores intensidades de centelleo, la distribución a corto plazo de la amplitud mostraba un desplazamiento hacia las muestras negativas. Es decir que para fluctuaciones de centelleo grandes, las atenuaciones son mayores que las ganancias.

- Distribución de Rice-Nakagami.

Van de Kamp[26] propone una distribución de Rice-Nakagami para la amplitud de centelleo:

$$p(\chi|\sigma_\chi) = \frac{\ln 10 \cdot 10^{\frac{2\chi}{20}}}{20 \cdot \xi^2} \exp\left(-\frac{10^{\frac{2\chi}{20}} + 1}{2\xi^2}\right) I_0\left(\frac{10^{\frac{\chi}{20}}}{\xi^2}\right) \quad (9)$$

Donde I_0 es una función de Bessel modificada de orden cero y ξ es una medida de la intensidad del centelleo relacionada con la varianza.

3.7.2.2. Distribución a largo plazo de la desviación típica

Para la distribución a largo plazo de la desviación típica se puede encontrar en la literatura dos distribuciones, una distribución log-normal y una distribución gamma.

- Distribución log-normal.

Según el modelo de Mousley y Vilar[24], la desviación típica a largo plazo sigue una función log-normal:

$$p(\sigma_\chi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}s_\sigma\sigma_\chi} \exp\left(-\frac{(\ln\sigma_\chi - m_\sigma)^2}{2s_\sigma^2}\right) \quad (10)$$

Donde m_σ y s_σ es la media y la desviación típica de la variable $\ln(\sigma_\chi)$ respectivamente.

- Distribución Gamma.

Karasawa [27] propone que la distribución de σ_χ sigue una función gamma:

$$p(\sigma_\chi) = \frac{(\alpha/m_\sigma)^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \sigma_\chi^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{\alpha\sigma_\chi}{m_\sigma}\right) \quad (11)$$

Siendo:

$$\alpha = \frac{m_{\sigma}^2}{\sigma_{\sigma}^2} \quad (12)$$

Donde m_{σ} es el valor medio de σ_{χ} , σ_{σ} es la desviación típica de σ_{χ} y $\Gamma(\alpha)$ es la función de Euler de segundo orden.

3.7.3. Caracterización espectral de los sucesos de centelleo

El espectro del centelleo tiene la apariencia de ruido blanco con dos regiones diferenciadas: una primera de baja frecuencia en la que la densidad de potencia es prácticamente constante, $W^0(f)$ y otra de alta frecuencia $W^{\infty}(f)$ que presenta una caída con una pendiente de $\omega^{-8/3}$.

3.7.4. Correlación con parámetros meteorológicos

El centelleo guarda una estrecha relación con los fenómenos turbulentos. A su vez varios parámetros meteorológicos tienen gran influencia en la aparición de turbulencias. La temperatura superficial es un generador de turbulencia debido a que el calentamiento de la superficie genera fuertes intercambios de energía. También la velocidad del viento y la humedad están asociadas a la generación de turbulencias.

El parámetro más utilizado por los modelos de predicción de centelleo es el índice de refracción húmedo N_{wet} . Esto es debido a que N_{wet} depende de la temperatura y de la humedad relativa, por lo que debería de tener una mayor correlación que si se analizan la temperatura y la humedad por separado. Se ha demostrado en experimentos una alta correlación al estudiar la variabilidad mensual de centelleo. Sin embargo esta relación no es tan clara en la variabilidad en horas diurnas, debido a la pequeña variación de este parámetro a lo largo del día. Por otro lado la temperatura sí es un buen indicador de centelleo en las horas diurnas.

En trayectos inclinados las nubes pueden crear variaciones en el índice de refracción que causen centelleo. Las más importantes son las que se originan por fenómenos convectivos como cúmulos o cumulonimbos. Estos tipos de nubes guardan una mayor concentración de vapor de agua que aquellas que se forman a una mayor altura como los estratos compuestos principalmente por hielo.

Por último el viento está relacionado de una forma indirecta con la presencia de turbulencias. Se considera que hay una débil relación entre la velocidad transversal del viento y la intensidad de centelleo.

3.7.5. Modelos de predicción de centelleo

Los modelos de predicción de centelleo usan básicamente tres variables meteorológicas: temperatura, humedad absoluta o relativa e índice de refracción absoluto (N_{wet}). Algunos de ellos incluyen información de nubosidad, como la cantidad de nubosidad o la cantidad de humedad contenida en la nube.

Muchos de los parámetros descritos en los distintos modelos son comunes y si no se especifica lo contrario se calcula del mismo modo que el especificado por el modelo de Karasawa. A continuación se detallarán los métodos de predicción utilizados en la

realización de este proyecto, recogidos tanto en la acción COST 255 [2] y COST 280 [29].

3.7.5.1. Karasawa

El modelo de Karasawa [27] ha sido validado con medidas para ángulos de elevación comprendidas entre 4 y 30 grados, frecuencias en el rango de 7,3 a 14,2 GHz y diámetros de antenas de 3 a 36,6 m. El valor promedio del índice de refracción húmedo varía de 20 a 130 ppm.

La desviación estándar viene dada por la siguiente fórmula:

$$\sigma_p = \sigma_{ref} \sqrt{f^{0,9} \cdot \frac{G(D_e)}{\sin^{2,6}\varepsilon}} \quad (13)$$

Siendo:

- f = frecuencia [GHz].
- ε = ángulo de elevación del enlace.
- $\sigma_{ref} = 3,42 \cdot 10^{-3} + 1,186 \cdot 10^{-4} \cdot N_{wet}$
- $N_{wet} = \frac{22790 \cdot U \cdot e^{19,7 \cdot T / (T+273)}}{(T+273)^2}$ = Índice de refracción absoluto del aire.
- U =Humedad relativa a nivel del suelo [%].
- T =Temperatura a nivel del suelo [°C].

Estos parámetros de entrada deben de ser promediados sobre un periodo de al menos un mes.

El factor $G(D_e)$ es una expresión en función del tamaño de la antena, dada por Crane y Blood[30]:

$$G(D_e) = \begin{cases} 1 - 0,7 \left(\frac{D_e}{\sqrt{\lambda \cdot L}} \right) & \text{para } 0 \leq \frac{D_e}{\sqrt{\lambda \cdot L}} \leq 1 \\ 0,5 - 0,2 \left(\frac{D_e}{\sqrt{\lambda \cdot L}} \right) & \text{para } 1 \leq \frac{D_e}{\sqrt{\lambda \cdot L}} \leq 2 \\ 0,1 & \text{para } 2 \leq \frac{D_e}{\sqrt{\lambda \cdot L}} \end{cases} \quad (14)$$

Donde:

- λ = longitud de onda [m].
- $D_e = \sqrt{\eta} \cdot D$ = Diámetro efectivo de la antena [m].
- D = Diámetro de la antena [m].
- η = eficiencia de la antena.
- $L = 2h / (\sqrt{\sin^2 \varepsilon + 2h/a_e} + \sin \varepsilon)$ = distancia de la capa turbulenta desde el receptor.
- $a_e = 8,5 \cdot 10^6$ = Radio efectivo de la Tierra [m].
- h = Altura de la turbulencia. Se sugiere un valor de 2000 [m] en el modelo de Karasawa.

El cálculo de la distribución acumulada de amplitud se calcula como:

$$As = \sigma_p \cdot y_+ \quad (15)$$

Donde y_+ es la desviación positiva de amplitud que depende del porcentaje de tiempo excedido P:

$$y_+ = (-0,0597 \log^3 P - 0,0835 \log^2 P - 1,258 \log P + 2,672) \quad (16)$$

Para $0,01\% \leq P \leq 50\%$

3.7.5.2. Recomendación UIT-R P.618-11

El modelo incluido en la Recomendación UIT-R P.618-11[19] es una modificación del modelo de Karasawa. Está basado en medidas con ángulos de elevación en el rango de 4 a 32 grados, para frecuencias de 7 a 14 GHz y diámetros de antena de 3 a 36 metros.

La varianza de centelleo se calcula como:

$$\sigma_p = \sigma_{ref} \sqrt{f^{7/6} \cdot \frac{g^2(x)}{\sin^{2,4} \varepsilon}} \quad (17)$$

Donde:

- f = frecuencia [GHz].
- ε = ángulo de elevación del enlace.
- $g^2(x) = 3,867(x^2 + 1)^{11/12} \cdot \sin\left(\frac{11}{6} \cdot \arctan \frac{1}{x}\right) - 7,0835x^{5/6}$
- $x = 0,0584 \cdot k \cdot D_e^2 / L$
- $\sigma_{ref} = 3,6 \cdot 10^{-3} + 10^{-4} \cdot N_{wet}$
- $N_{wet} = \frac{22810 \cdot U \cdot e^{17,5 \cdot T / (T+240,97)}}{(T+273)^2}$ = Índice de refracción absoluto del aire.
- U =Humedad relativa a nivel del suelo [%].
- T =Temperatura a nivel del suelo [°C]
- $L = 2h / (\sqrt{\sin^2 \varepsilon + 2h/a_e} + \sin \varepsilon)$
- h = Altura de la turbulencia. Se sugiere un valor de 1000[m] para el modelo de ITU-R.

A diferencia del modelo de Karasawa, el modelo de ITU-R contempla la distribución acumulada de atenuación por centelleo:

$$As = \sigma_p \cdot y_- \quad (18)$$

Donde y_+ es la desviación positiva de amplitud que depende del porcentaje de tiempo excedido P:

$$y_- = (-0,061 \log^3 P - 0,072 \log^2 P - 1,71 \log P + 3) \quad (19)$$

Para $0,01\% \leq P \leq 50\%$.

3.7.5.3. Modelo de Otung

El modelo de Otung[32] ha sido validado con medidas a lo largo de un año en Reino Unido usando la baliza de 20 GHz del satélite Olympus con un ángulo de elevación de 28,7° y 1,2 m de diámetro.

Este modelo es muy similar al ITU-R. La diferencia consiste en que mientras el modelo de ITU-R usa una dependencia empírica con el ángulo de elevación, el modelo de Otung usa un factor obtenida de expresiones teóricas. La varianza de centelleo queda definida como:

$$\sigma_p = \sigma_{ref} \sqrt{f^{7/6} \cdot \frac{g^2(x)}{\sin^{11/6} \varepsilon}} \quad (20)$$

Además de calcular la desviación típica $\sigma(p)$, el modelo de Otung contempla las distribuciones de ganancia $\chi_+(p)$ y de atenuación $\chi_-(p)$. Las siguientes expresiones son ajustes empíricos a medidas experimentales:

$$\sigma(p) = 2,847 \cdot \sigma \cdot \exp(0,0183 \cdot p - (0,3455 + 5,007 \cdot 10^{-3} \cdot p) \ln(p)) [dB] \quad (21)$$

$$\chi_+(p) = 3,1782 \cdot \sigma \cdot \exp(-0,03596 \cdot p - (0,2721 + 0,00438 \cdot p) \ln(p)) [dB] \quad (22)$$

$$\chi_-(p) = 3,6191 \cdot \sigma \cdot \exp\left(\frac{-9,5014 \cdot 10^{-4}}{p} - (0,40454 + 0,00285 \cdot p) \ln(p)\right) [dB] \quad (23)$$

Este modelo es válido para ángulos de elevación entre 6,5 y 30°.

3.7.5.4. Método de Ortgies

El modelo de Ortgies[33] se ha derivado de medidas durante 30 meses del satélite Olympus en Alemania en 12, 20 y 30 GHz y con ángulos de elevación de 6,5 y 30°.

Se diferencian dos expresiones del valor medio m de $\ln(\sigma^2)$ dependiendo del parámetro a utilizar. La primera (Ortgies-N), describe m usando el índice de refracción absoluto del aire N_{wet} :

$$\sigma^2 = \exp\left(0,5 \cdot \left(0,0462 \cdot N_{wet} - 13,45 - \log\left(\frac{(\sin \varepsilon)^{2,4}}{g^2(x) \cdot f^{1,21}}\right)\right)\right) \quad (24)$$

La segunda expresión (Ortgies-T), hace uso de la temperatura a nivel del suelo T [°C]:

$$\sigma^2 = \exp\left(0,5 \cdot \left(0,0865 \cdot T - 12,5 - \log\left(\frac{(\sin \varepsilon)^{2,4}}{g^2(x) \cdot f^{1,21}}\right)\right)\right) \quad (25)$$

3.7.5.5. Modelo de Marzano

El modelo de Marzano [34] estima la intensidad de centelleo a partir de 10 años de medidas del satélite Olympus a 19,8 GHz. De este modelo se derivan varias expresiones que relacionan la intensidad de centelleo con parámetros meteorológicos medidos en superficie.

Las expresiones más usadas son las que relacionan la varianza media mensual en función de dos parámetros meteorológicos: temperatura y humedad relativa para el caso de STH2 o temperatura y N_{wet} para el caso de STN2:

- STH2:

$$\sigma_{ref}^2 = \exp(-14,95 + 0,1546 \cdot T + 0,0747 \cdot HR - 0,0011 \cdot T^2 - 0,0005 \cdot HR^2) \quad (26)$$

$$\sigma^2 = \sigma_{ref}^2 \cdot g^2(x) \cdot f^{7/6} \cdot \sin \varepsilon^{-2,4} \quad (27)$$

- STN2:

$$\sigma_{ref}^2 = \exp(-12,39 + 0,13 \cdot T + 0,0151 \cdot N_{wet} - 0,0016 \cdot T^2 - 0,0001 \cdot N_{wet}^2) \quad (28)$$

$$\sigma^2 = \sigma_{ref}^2 \cdot g^2(x) \cdot f^{7/6} \cdot \sin \varepsilon^{-1,83} \quad (29)$$

3.7.6. Centelleo en presencia de lluvia

El centelleo húmedo está provocado por mecanismos adicionales a la turbulencia troposférica, causa exclusiva del centelleo seco. Varios autores han estudiado de manera teórica y experimental este evento, sacando diversas hipótesis:

- Existe una correlación entre turbulencias y lluvia. La turbulencia húmeda generada por mezclas de aire con diferentes contenidos de agua crece con la intensidad de lluvia.
- Las variaciones en la orientación y el tamaño de las gotas de lluvia pueden causar fluctuaciones rápidas de la atenuación alrededor de su valor medio. Con la ayuda de disdrómetros se ha conseguido relacionar parcialmente la forma de la gota de lluvia con el centelleo húmedo.
- La dispersión incoherente de las gotas de lluvia es un mecanismo provocador de amplitud en la señal recibida. Según [35] la magnitud de las fluctuaciones es pequeña comparada con el centelleo inducido por turbulencias.

3.7.7. Relación entre centelleo y atenuación

Diversos experimentos han demostrado una relación entre centelleo y atenuación por lluvia. Tanto Karasawa [27] como Matricciani [36] expresaron dicha relación de forma exponencial, tras la realización de experimentos a 11 y a 20 GHz respectivamente. Por otro lado Mertens-Vanhoenacker [37] sostiene una relación lineal a 12,5 GHz.

3.8. Combinación de efectos

Generalmente los efectos anteriormente descritos no suceden de manera aislada. Por ejemplo, la lluvia aparece con fenómenos de formación de nubes. Para combinar los distintos fenómenos no se suman todas las contribuciones individuales ya que implicaría que sucediesen simultáneamente y daría lugar a una atenuación mucho mayor de la existente.

3.8.1. Modelos de combinación de efectos

A continuación se describirán 3 modelos de combinación de efectos:

3.8.1.1. Modelo de Dissanayake, Allnutt y Haidara (DAH)

El modelo de Dissanayake, Allnutt y Haidara [38] divide la atenuación total en dos regiones diferenciadas: cielo claro y precipitación. Para frecuencias superiores a 10 GHz se define una suma de componentes de absorción para niveles de probabilidad entre τ_1 y τ_2 en la región de transición, donde τ_1 depende de la lluvia y τ_2 del ángulo de elevación.

La atenuación total se calcula como la raíz de la suma de la componente de la absorción total y la componente de desvanecimiento por centelleo.

3.8.1.2. Modelo de Castanet-Lemorton

El método de Castanet-Lemorton [39] fue propuesto dentro del marco de la acción COST 255. En este método se separan las componentes de atenuación debida al oxígeno y al vapor de agua. El valor de la atenuación debida al oxígeno se toma como un valor fijo mientras que la atenuación debida al vapor de agua es variable y se requiere su distribución acumulada.

3.8.1.3. Modelo de la UIT-R

El modelo de la UIT se recoge en la Recomendación P.618-11 [19]. Se utiliza para frecuencias superiores a 18 GHz con bajos ángulos de elevación. Toma como parámetros de entrada la atenuación debida a la lluvia, la atenuación debida a las nubes, la atenuación debida al vapor de agua y al oxígeno y la atenuación debida al centelleo troposférico.

3.9. Dinámica de desvanecimientos

Las características dinámicas de los desvanecimientos pueden ser de gran importancia para el diseño de muchos sistemas de telecomunicaciones. No basta con saber la atenuación rebasada por un porcentaje de tiempo determinado. Para evaluar correctamente la probabilidad de fallo debe conocerse la probabilidad de aparición de desvanecimientos de una determinada duración. Asimismo, para evaluar los parámetros internos de un bucle de control que aplica técnicas FMT, se requiere la probabilidad de aparición de una pendiente de desvanecimiento correspondiente a un determinado umbral de atenuación.

3.9.1. Definición de parámetros

El desvanecimiento se define como toda disminución de la potencia recibida con respecto a su valor nominal. La diferencia entre este nivel nominal y el nivel recibido en condiciones de desvanecimiento se denomina profundidad de desvanecimiento y se expresa en dB.

En la figura se muestran gráficamente tres parámetros relacionados con los desvanecimientos:

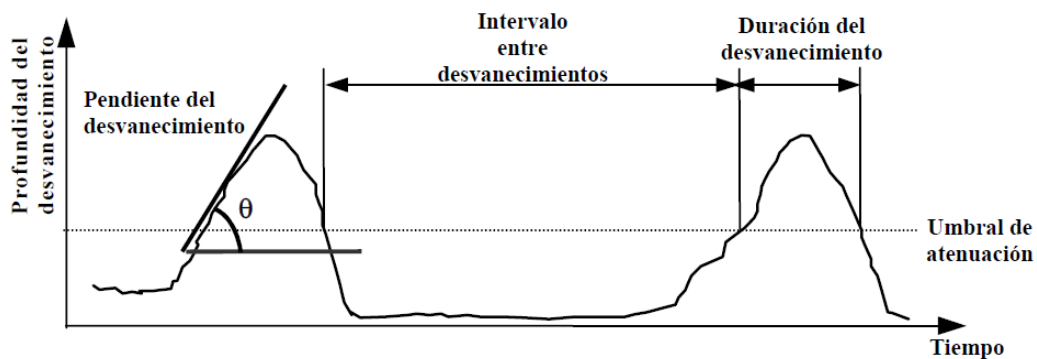


Ilustración 3. Ejemplo de desvanecimiento

- Pendiente de desvanecimiento: Velocidad de variación de la atenuación con el tiempo.
- Intervalo entre desvanecimientos: Tiempo entre el cual la señal cae por debajo del mismo umbral de atenuación.
- Duración del desvanecimiento. Intervalo de tiempo transcurrido entre dos rebasamientos por encima de un mismo umbral.

3.9.2. Duración de los desvanecimientos

Las estadísticas de duraciones de desvanecimientos son importantes en el diseño de sistemas de telecomunicaciones en los siguientes aspectos:

- Interrupción e indisponibilidad del sistema: las estadísticas de duración de los desvanecimientos proporcionan información sobre el número y duración de las interrupciones del sistema en la propagación por un determinado enlace o servicio.
- Compartición de los recursos del sistema: desde el punto de vista del operador es importante tener una idea estadística de un suceso para poder asignar recursos a otro usuario.
- FMT: la duración de los desvanecimientos es importante para poder permanecer en una configuración que le permita compensar las pérdidas antes de volver a su estado original.

- Codificación y modulación del sistema: la duración de los desvanecimientos es un elemento fundamental para seleccionar los códigos de corrección de errores en recepción sin canal de retorno y asignar mejores esquemas de modulación dependiendo de la calidad del enlace. La duración del desvanecimiento repercute directamente en la selección del esquema de codificación (tamaño y palabra de codificación en código bloque, entrelazado en códigos concatenados, etc.).

Es habitual la distinción entre desvanecimientos de corta y larga duración. Los desvanecimientos cortos se deben esencialmente al centelleo y a las rápidas fluctuaciones de la lluvia. Se suele estimar en 30 segundos la frontera de separación entre duraciones cortas y largas, aunque no hay consenso claro acerca de ese valor.

A partir de experimentos de propagación, la mayor parte en frecuencias de 11 a 30 GHz se ha determinado que los desvanecimientos de larga duración pueden describirse por una distribución log-normal. Para las duraciones cortas suele considerarse una distribución potencial. Tanto las distribuciones cortas como las de duraciones largas dependen de la frecuencia, ángulo de elevación y umbral de atenuación.

Entre los modelos de predicción de duraciones algunos son empíricos y otros se basan en la relación entre duración de episodios de lluvia (calculados a partir de medidas pluviométricas) y duración de desvanecimientos. El más completo es el de la UIT-R P.1623 [39], que permite estimar tanto las duraciones largas como las cortas.

3.9.3. Duración del intervalo entre desvanecimientos

Para un operador es esencial conocer estadísticamente el tiempo que transcurre desde que el nivel de la señal recibida ha caído por debajo del umbral después de un suceso de interrupción hasta que se produzca otro suceso de interrupción.

Los resultados experimentales indican que las estadísticas de los intervalos entre desvanecimientos siguen una distribución log-normal. Sin embargo, se prevé que los intervalos entre desvanecimientos de corta duración causados por el centelleo troposférico sigan una distribución potencial, igual que las estadísticas de duración de desvanecimientos de corta duración.

3.9.4. Pendiente de desvanecimiento

El estudio de la dinámica temporal de los efectos que inciden en la propagación es esencial para el diseño de técnicas adaptativas de mitigación de desvanecimientos (FMT). En sistemas de comunicaciones por satélite que emplean técnicas FMT es imprescindible la adecuada caracterización de la pendiente de los desvanecimientos. Por una parte, el conocimiento de la pendiente de la señal recibida es útil para el diseño del bucle de control que sigue las variaciones de la señal. Por otro lado, el valor de la pendiente en un instante determinado puede servir para deducir a corto plazo el comportamiento del canal de propagación.

En general, la información más relevante es la pendiente de las componentes de señal de variación lenta, como la atenuación por lluvia y nubes. Se excluyen por tanto las fluctuaciones rápidas como las debidas al centelleo troposférico. El bucle de control de

las técnicas de mitigación de desvanecimientos no suele tener en cuenta las componentes tan rápidas porque filtra previamente la señal. Además, las fluctuaciones rápidas no sirven para la predicción a corto plazo, se ha demostrado que la función de autocorrelación del centelleo decrece rápidamente con el tiempo y puede considerarse que las componentes de centelleo están completamente incorreladas dos segundos después.

La distribución de probabilidad de las pendientes de los desvanecimientos depende de varios parámetros climáticos, tales como la distribución del tamaño de las gotas de lluvia y el tipo de lluvia. La velocidad del viento es otro parámetro a tener en cuenta ya que determina el tiempo que tarda una célula de lluvia en atravesar el trayecto de propagación.

También es importante la longitud del trayecto de propagación. Al aumentar la longitud del trayecto disminuye la pendiente de desvanecimiento debido al efecto suavizado que produce la suma de las distintas contribuciones de lluvia. Por lo tanto para un enlace inclinado la pendiente aumenta al aumentar la verticalidad del enlace.

Además, el valor de la pendiente medida se ve afectada por los parámetros dinámicos del receptor. Un receptor con un mayor tiempo de integración reducirá la variación instantánea y lo expandirá a lo largo de un periodo de tiempo mayor.

Los modelos de predicción son muy escasos y de naturaleza empírica. Entre ellos el más completo es el modelo de predicción de la UIT-R P1623 [40].

Capítulo 4. Descripción del experimento y equipos utilizados

En este capítulo se detallarán los equipos utilizados a lo largo de la realización del experimento, así como de las bases de datos de parámetros meteorológicos.

En el apartado 4.1 trata sobre el programa de satélites EUTELSAT y en concreto el utilizado para las medidas en este proyecto, el satélite Hot Bird 13A.

En el apartado 4.2 se especificarán los equipos utilizados en la estación terrena, emplazada en la ETSIT de la UPM.

Por último en el apartado 4.3 se describirán las distintas bases de datos consultadas.

4.1. Programa Eutelsat

Eutelsat es una compañía francesa de comunicaciones de distribución de televisión y radio vía satélite. Es el principal operador de Europa y el tercero del mundo.

Entre los servicios ofrecidos se encuentra la difusión de radio (1100 estaciones) y televisión (5000 canales) vía satélite, periodismo electrónico e intercambio de programas. A su vez ofrece una amplia gama de servicios de telecomunicaciones móviles y fijas, mercados de participación de televisión, redes corporativas y mercados de banda ancha para proveedores de servicios de internet y mercados de transporte marítimo y aéreo.

Su flota consta de 34 satélites geoestacionarios, siendo 31 de ellos de propiedad exclusiva, dando cobertura principalmente a Europa, Norte de África y Oriente Medio, incluso algunos de sus satélites dan cobertura a Latinoamérica y Asia que llega a dos terceras partes de la población mundial. Estos satélites están situados entre los 116,8 grados Oeste hasta los 172 grados Este.



Ilustración 4. Localización de los satélites de la flota EUTELSAT

A pesar de su gran cobertura en los próximos 3 años (2014-2016) Eutelsat pretende lanzar 7 nuevos satélites para mejorar su presencia y renovar su flota de satélites.

4.1.1 Eutelsat HotBird 13A

El satélite Hot Bird 13A (también conocido como Hot Bird 6) es un satélite del grupo de satélites Hot Bird, cuyo operador es Eutelsat localizado a 13º Este sobre el ecuador. Su radio de cobertura cubre Europa, el norte de África y Oriente Medio.

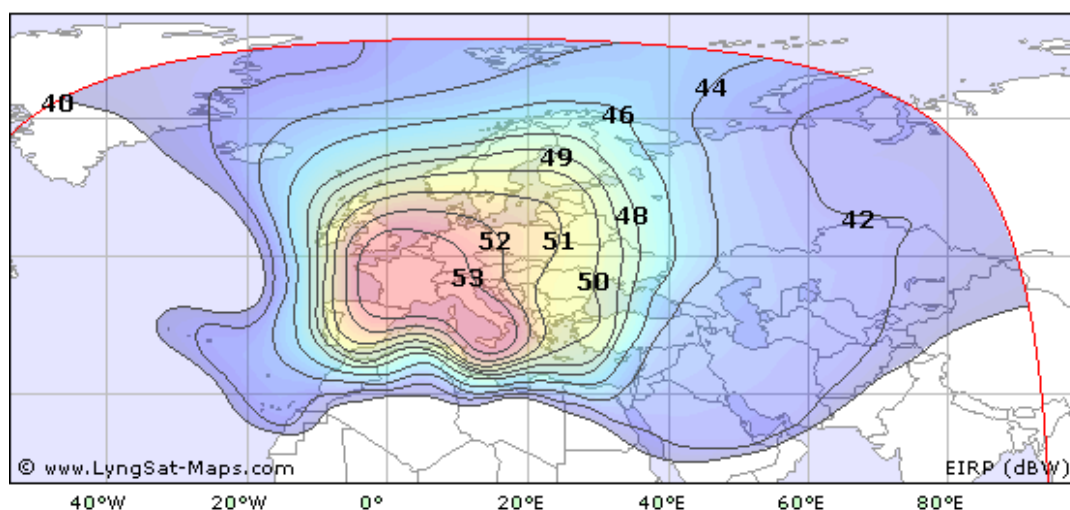


Ilustración 5. Área de cobertura del satélite HotBird 13A.

Fue lanzado el 21 de agosto de 2002 por el cohete Atlas V. En junio de 2013 fue trasladado a una nueva posición, situándose a los 8º Oeste y cambiando su nombre por *Eutelsat 8 West C*. Su antigua área de operación ha sido cubierta por el satélite *Hot Bird 13D*.

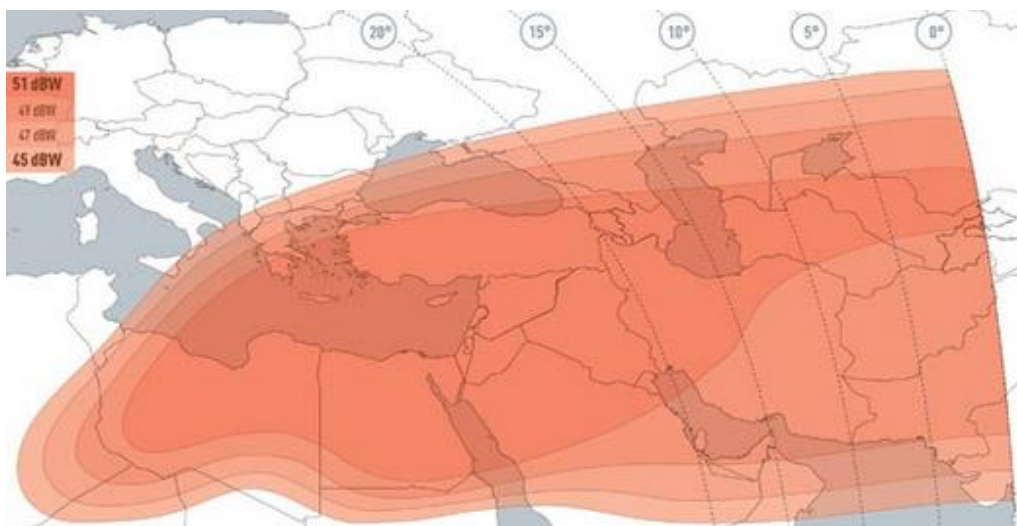


Ilustración 6. Área de cobertura del satélite Eutelsat 8 West C.

En la tabla siguiente se muestran los datos más relevantes del antiguo satélite *Hot Bird 13A*:

Nombre del Satélite	HotBird 13A (HotBird 6)
Posición	13° Este
Operador	Eutelsat
Fabricante	Alcatel Alenia Space
Fecha de lanzamiento	21 de agosto
Peso	2995 Kg
Vida útil estimada	12 años
Lanzador	Atlas V
Transpondedores	28 en banda Ku, 4 en banda Ka
Frecuencias del enlace descendente (GHz)	10,7 – 11,2 – 11,45 – 11,7 – 12,5 – 12,75 – 19,7 – 20,2
Frecuencias del enlace ascendente (GHz)	13,75 – 14,00 – 14,25 – 14,5 – 29,5 – 30,0
Balizas (GHz)	11,101 – 11,700 – 19,701
PIRE mínimo de la baliza	8 dBW (Ku), 9 dBW (Ka)
Polarización de la baliza	Horizontal
Modulación	QPSK
Régimen de símbolos	27500 símbolos/s
FEC	2/3

4.2. Localización de la estación terrena

El receptor usado para obtener las medidas está situado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid (ETSIT), cuyas coordenadas son: 40° 27' 11" Norte, 3° 43' 37" Oeste y situado a 673 m por encima del nivel del mar.



Ilustración 7. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación (ETSIT). La estación terrena se emplaza en el edificio de la parte superior de la imagen.

Para el cálculo del ángulo de azimut y elevación se ha seguido el siguiente procedimiento.

En primer lugar asignamos correctamente los signos a los datos de longitud y latitud de la estación terrena y del satélite:

- Longitud del satélite: $\varphi_{sat} = 13^\circ \text{ Este} = 13^\circ$
- Longitud de la estación terrena: $\varphi_{est} = 3.7^\circ \text{ Oeste} = -3,7^\circ$
- Latitud de la estación terrena: $\lambda = 40.5^\circ \text{ Norte} = 40,5^\circ$

Calculamos la longitud relativa:

$$\varphi = \varphi_{est} - \varphi_{sat} = -16,7^\circ \quad (30)$$

Se define el ángulo auxiliar \hat{E} :

$$\hat{E} = tg^{-1} \left[\frac{tg\varphi}{sen\lambda} \right] = tg^{-1}[-0.4619] = -24,79^\circ \quad (31)$$

El ángulo acimutal se obtiene a partir del ángulo auxiliar \hat{E} , teniendo en cuenta en que cuadrante se encuentra la estación terrestre en relación al punto subsatélite. En este caso el cuadrante es el NO, por lo que la expresión a utilizar es:

$$\hat{A} = 180 - \hat{E} = 155,21^\circ \quad (32)$$

Para calcular el ángulo de elevación, en primer lugar se obtiene el valor de a :

$$a = \cos^{-1}[\cos\varphi \cdot \cos\lambda] = 43,25^\circ \quad (33)$$

Finalmente teniendo en cuenta el radio terrestre ecuatorial ($R_e = 6378 \text{ km}$) y la distancia al centro de la Tierra ($R = 42164 \text{ km}$), se obtiene el ángulo de elevación:

$$\varepsilon = tg^{-1} \left[\frac{(\cos a - R_e/R)}{sen a} \right] = tg^{-1}[-0,84] = 40,1^\circ \quad (34)$$

El ángulo de elevación y azimut son los siguientes:

Azimut	155,21º
Elevación	40,1º

4.3. Equipo receptor

La estación experimental consta de dos unidades: una unidad interior encargada de la recepción y amplificación de la señal proveniente del satélite y una interior encargada de filtrado y almacenamiento de datos.

4.3.2. Unidad exterior

La unidad exterior consta de una antena Cassegrain centrada seguida de equipos encargados de conducir, filtrar y bajar la frecuencia de la señal recibida hasta un cable de bajada que se dirige a la unidad interior. En la figura 8 se muestra el esquema de la unidad exterior.

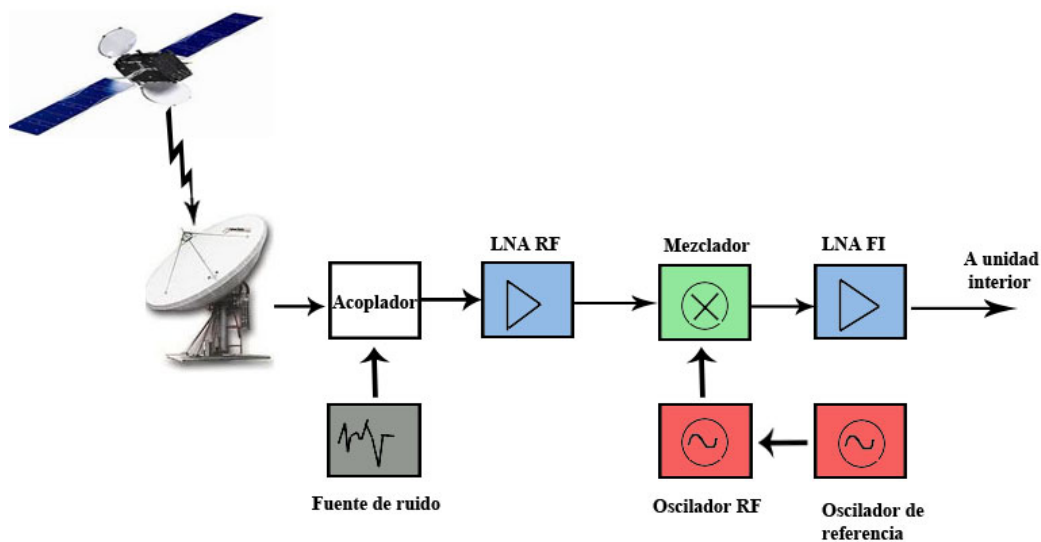


Ilustración 8. Esquema de la unidad exterior.

- **Antena:**

La función de la antena es recibir la señal de la baliza de 19,7 GHz del satélite *Eutelsat Hot Bird 13A*. Esta antena ha sido diseñada por el Grupo de Radiación de la ETSIT, adaptando a la frecuencia de 19,7 GHz los componentes de anteriores experimentos con el satélite ITALSAT a 50 GHz.

Se trata de una configuración Cassegrain centrada y está instalada sobre un sistema de apuntamiento automático con dos motores paso a paso que permite el apuntamiento automático del satélite. El reflector principal tiene un diámetro de 1,2 m, resultando un ancho del haz del orden de 0,5º, y una ganancia de 45 dBi. La eficiencia total es superior al 80%. Estos valores permiten tener un amplio margen para desvanecimientos (30 dB) y a la vez que el ancho del haz no sea tan estrecho como para requerir un apuntamiento continuo de la antena.



Ilustración 9. Antena receptora.

- **Acoplador:**

Permite acoplar la señal de ruido junto a la señal proveniente de la antena.

- **LNA RF:**

Amplificador de bajo ruido encargado de amplificar la señal de radiofrecuencia. La entrada del amplificador viene por guía de onda y sale por cable coaxial SMA.

- **Mezclador + Oscilador RF + Oscilador de referencia:**

Se encarga de reducir la señal de RF (19,7 GHz) a frecuencia intermedia (167,6 MHz). El oscilador de radiofrecuencia es un oscilador de cavidad enganchado en fase, sintonizado a una frecuencia de 19,8686 GHz. La señal de referencia se obtiene a partir de un generador de señal presente en el laboratorio, situado en la unidad interior. Esta frecuencia de referencia es de 97,666 MHz con un nivel de 6 dBm programado en el generador de señal. Con el fin de reducir a la mitad el nivel de ruido tras la conversión se ha utilizado un mezclador con rechazo a frecuencia imagen.

- **LNA FI:**

Amplificador de bajo ruido encargado de amplificar la señal a la salida del mezclador.

A continuación se muestra la fotografía del cabezal anclado en la parte posterior de la antena:

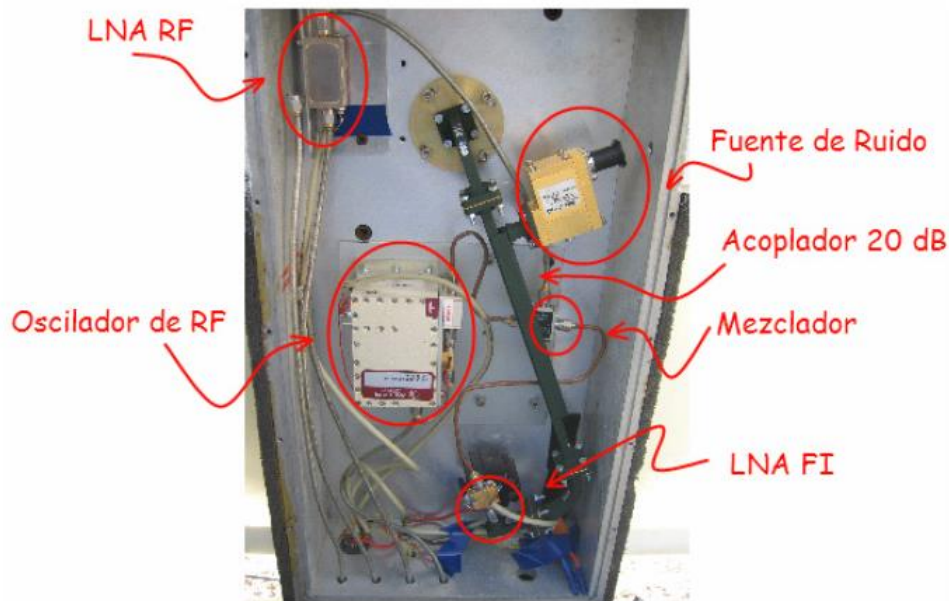


Ilustración 10. Unidad exterior.

4.3.3. Unidad interior

En la unidad interior se filtra, se convierte a una frecuencia menor, se vuelve a filtrar la señal y se almacenan los datos en un ordenador. En la siguiente figura se muestra el esquema de la unidad interior:

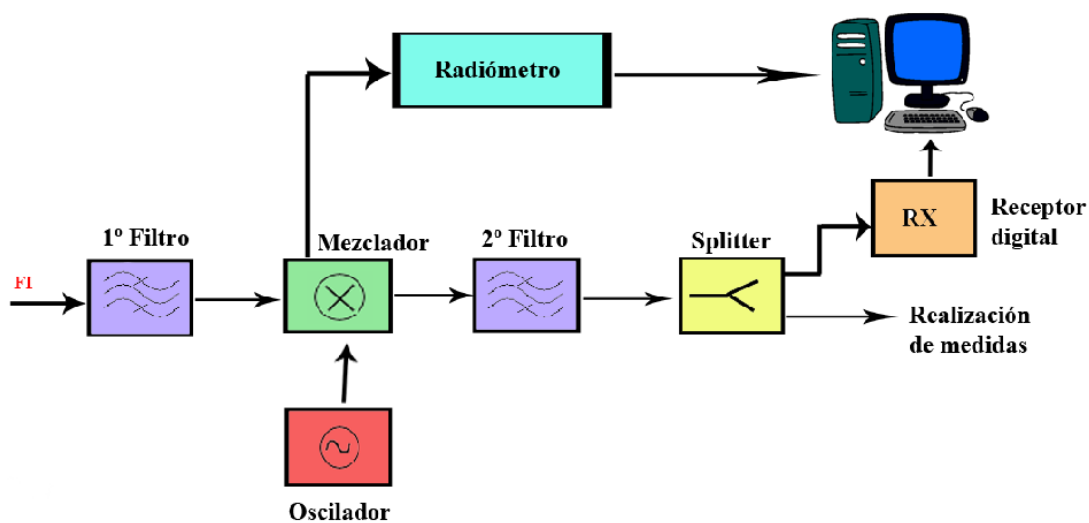


Ilustración 11. Esquema de la unidad interior.

- **1^{er} Filtro:**

A la señal de frecuencia intermedia proveniente de la unidad exterior se realiza un filtrado paso banda con el fin de eliminar el ruido y la frecuencia imagen resultante de la salida del mezclador de la unidad interior. Este filtro se encuentra centrado en 160 MHz y tiene un ancho de banda de 20 MHz, de forma que permite el paso de la señal generada por el satélite y la señal de ruido centrada a 153 MHz con ancho de banda de 5 MHz generada por la fuente de ruido y que servirá para realizar medidas por el hardware de radiometría.

- **Etapas de mezclado:**

Desdobra la señal en dos vías: una primera se dirige al radiómetro y una segunda se dirige al mezclador. El mezclador se encarga de bajar la señal de FI a una segunda frecuencia intermedia de 70MHz. Para ello en la segunda entrada del mezclador se inyecta una señal de 230 MHz.

- **2º Filtro:**

La señal saliente del mezclador se filtra para además de eliminar ruido, filtrar los posibles espurios generados en la conversión de frecuencia. Se encuentra centrado en 70 MHz y con un ancho de banda de 2 MHz.

- **Divisor de potencia (splitter):**

Se encarga de desdoblar la señal en dos vías: una de ellas se dirige al receptor digital y la segunda salida se utiliza para realizar medidas del nivel de señal.

- **Receptor digital:**

Realiza la detección de la señal y posterior almacenaje de los datos en un PC. Mide el nivel de señal y su fase a una tasa de 18,66 muestras por segundo. La información se envía al ordenador donde se almacena para el análisis posterior. La medida del umbral de recepción es muy baja, del orden de 30 dBHz en términos de C/N_0 .

4.4. Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos usados para la realización de este proyecto han sido recogidos por varios equipos y zonas distintas. Comprenden un periodo de tiempo igual a la duración del experimento, esto es 7 años, aunque dependiendo de la base de datos consultada la frecuencia es diferente. La principal es la estación meteorológica del grupo de Radiocomunicación, situada a escasos metros de la antena receptora. Se ha recogido información adicional de varias organizaciones como ERA-Interim, SYNOP (AEMET-Barajas) y el GNSS (Villafranca).

4.4.1. Estación meteorológica de la ETSIT

La estación meteorológica está situada junto a la unidad exterior con el fin de medir los fenómenos atmosféricos lo más cerca posible a las condiciones del medio que atraviesa la onda.

Los datos meteorológicos son medidos en superficie, útiles de cara a implementar ciertos modelos de predicción de algunos fenómenos atmosféricos, como el centelleo, o para realizar estadísticas de variación de estos parámetros.

Estos parámetros se recogen en un formato útil y se almacena en un ordenador para posteriormente disponer de ellos en diversos experimentos. Los parámetros recogidos son:

- **Temperatura ambiente:** Temperatura del aire medida en las proximidades del receptor. Se presenta en °C.

- **Humedad relativa:** Porcentaje de vapor de agua contenido en el ambiente. Se expresa en tanto por ciento (%).
- **Presión:** Presión atmosférica en la estación meteorológica. Se muestra en mbar.
- **Velocidad y dirección del viento:** La velocidad del viento se expresa en m/s y la dirección se mide en grados.
- **Intensidad de lluvia:** Cantidad de lluvia recogida en la estación. A pesar de que se expresa en mm/h el tiempo de integración del sensor es de 10 minutos.

A continuación se presentarán los distintos sensores y equipos instalados en la estación meteorológica.

4.4.1.1. Pluviómetro

La estación meteorológica no proporciona unas medidas fiables sobre la intensidad de lluvia, puesto que únicamente se toman datos cada 10 minutos, siendo insuficiente la resolución para caracterizar adecuadamente un parámetro tan variable como la intensidad de lluvia. Por esta razón se incorpora un registro temporal individual al pluviómetro que permite obtener los datos de la intensidad de lluvia con una mayor resolución temporal.

El pluviómetro empleado es de tipo balancín o de cazoletas basculantes (tipping-bucket). Este tipo de pluviómetros recoge el agua de lluvia en un embudo y es guiada a una cazoleta. La primera cazoleta bascula después de recoger una cantidad de 0,1 mm y se registra en memoria el instante de tiempo del vuelco. Al bascular, la segunda cazoleta se posiciona para recoger el agua procedente del embudo. Una vez llena, las cazoletas basculan en sentido contrario produciéndose un nuevo registro del instante en que esto ocurre. Por lo tanto, este tipo de pluviómetro no registra la cantidad de lluvia acumulada en un periodo de tiempo sino que registra el instante en el que se produce el vuelco.

Por lo tanto, la intensidad de lluvia es medida por un único pluviómetro y es procesada mediante dos mecanismos distintos. En el primer caso, se registra la cantidad de lluvia acumulada en periodos de 10 minutos sumando la cantidad de vuelcos que se han producido en ese intervalo. En el segundo caso se registra el instante de cada vuelco, correspondiente a una cantidad de 0.1 mm, en ese caso para obtener la intensidad de lluvia se requiere un procesamiento posterior.



Ilustración 12. Pluviómetro.

4.4.1.2. Disdrómetro

El disdrómetro (Laser Precipitation Monitor) se encarga de la medida de la distribución en tamaño como de la velocidad de las gotas de lluvia, permitiendo discriminar entre los distintos tipos de precipitación: lluvia, granizo, nieve, etc. El equipo dispone de un sensor al que le llega un haz laser, interrumpiéndose la recepción al paso de cualquier cuerpo entre el emisor y receptor laser. También detecta las fluctuaciones térmicas de los componentes ópticos, así como la posible influencia causada por la luz extrínseca, procediendo a su compensación. Se instaló en 2008 y es de la marca THIES.



Ilustración 13. Disdrómetro

4.4.1.3. Radar meteorológico

El Micro Rain Radar (MMR) de la marca METEK, es un radar de apuntamiento vertical que funciona a la frecuencia de 24,1 GHz. El radar efectúa mediciones de los espectros Doppler, y a partir de ellos permite obtener las distribuciones a distintas alturas de tamaños de gotas de lluvia (DSD, *drop size density distributions*). El radar también proporciona perfiles de reflectividad, contenido de agua líquida, intensidad de lluvia y velocidad terminal. Todo ello contribuye para obtener una caracterización más detallada del perfil de lluvia.



Ilustración 14. Radar meteorológico.

4.4.2. ERA-Interim

ERA-Interim es un reanálisis de la base de datos de ECMWF. Cubre un periodo desde 1979 hasta la actualidad. Los datos son añadidos mes a mes con un retardo de 3 a 4 meses después del último mes añadido.

Los datos almacenados en ERA-Interim son calculados mediante una combinación de modelos de predicción y observaciones de estaciones repartidas por todo el mundo para predecir de forma óptima la estimación de parámetros meteorológicos en numerosos puntos del planeta.

Para el análisis de parámetros ERA-Interim dispone de dos métodos: *analyses* y *forecast*. Con el primero los datos son producidos mediante la combinación en periodos de tiempo cortos de datos *forecast*. Por otro lado los datos calculados por el método *forecast* se realizan mediante un modelo de predicción recogiendo medidas reales de parámetros meteorológicos.

Dependiendo del método escogido para la predicción de los parámetros se tienen distintas horas para el almacenado. Para algunos tipos de parámetros al poder ser calculados por ambos métodos la resolución mínima temporal es de 3 horas, para los

que solo se pueden calcular por un método la resolución pasa a 6 horas. La resolución espacial de esta base de datos en la última versión es de 0,125 grados.

El cálculo de los datos almacenados en ERA-Interim parte de una serie de observaciones de parámetros medidas por estaciones meteorológicas tanto terrestres como marítimas, radiosondas y satélites. Aunque hay una gran variedad de parámetros almacenados en Era-Interim se pueden destacar las siguientes:

- Velocidad del viento.
- Nubosidad total medido en octas.
- Presión en superficie.
- Temperatura en superficie.
- Cantidad de ozono.
- Cantidad de vapor de agua.
- Intensidad de lluvia.
- Intensidad de precipitación de nieve.

4.4.3. GNSS

El sistema global de navegación por satélite (GNSS) puede ayudar al cálculo del vapor de agua integrado. Este sistema hace uso del retardo en exceso producida por la onda debido al vapor de agua (ZWD) en la atmósfera para calcular este parámetro.

Los datos usados en este proyecto calculados por GNSS han sido procesados por el Grupo de Tecnologías de la Información y Comunicaciones de la ETSIT. Muestran información de la cantidad de vapor de agua integrada (IWVC), así como el tiempo en el que se ha recogido la información, cubriendo el periodo desde 2007 a 2012 recogiendo un dato cada 5 minutos.

La localización de la estación para la realización de las medidas se encuentra en la estación meteorológica de Villafranca del Castillo, dependiente de la ESA y situada a 20 km de la ETSIT.

4.4.4. Datos AEMET

La Agencia Estatal de Meteorología es la encargada de suministrar servicios meteorológicos al Estado. Dispone de una red de 90 observatorios con personal, 700 estaciones automáticas, así como 4500 estaciones pluviométricas atendidas por colaboradores altruistas. Para el procesado y recepción de las imágenes satelitales se utiliza los satélites geoestacionarios METEOSAT y GOES-Este y de los polares TIROS-NOAA y METOP.

4.4.4.1. Registros históricos

Para la obtención de los registros históricos se ha consultado la base de datos de Ogimet¹. Este utiliza los datos disponibles en la red de forma pública, principalmente de la NOAA y de software libre para su tratamiento. Entre el amplio rango de contenidos alojados en la web se permite consultar los registros tanto diarios y mensuales de varias estaciones meteorológicas.

¹ <http://www.ogimet.com/>

Entre los parámetros que se pueden consultar se destacan los siguientes:

- Presión atmosférica
- Temperatura media
- Precipitación acumulada
- Velocidad máxima del viento
- Humedad relativa
- Temperatura en el punto de rocío

Para la realización de este proyecto se ha consultado los valores mensuales de la estación Madrid-Retiro.

4.4.4.2. Datos sinópticos

Los registros de SYNOP constituyen la mayor forma de intercambio internacional de datos meteorológicos medidos en superficie. Existen 15000 observatorios repartidos por todo el mundo que toman registros SYNOP, tanto en estaciones en tierra como en barcos. La toma de datos se realiza de manera simultánea en todas las estaciones, a las 0, 6, 12 y 18 horas UTC.

En Madrid existen varios observatorios del Instituto Nacional de Meteorología con información sinóptica. Sólo se utilizarán los datos del observatorio de Barajas, situado a unos 13 km al este de la ETSIT.

Los parámetros meteorológicos registrados en los SYNOP abarcan desde los más sencillos, medidos por instrumental automático, hasta los más complejos, que requieren la observación de un operador especializado. Pueden destacarse los siguientes:

- Temperatura del aire.
- Temperatura del punto de rocío.
- Presión al nivel de la estación.
- Cantidad de precipitación caída en el periodo de 6 horas que precede a la observación.
- Altura, sobre la superficie, de la nube más baja observada.
- Dirección del viento
- Velocidad del viento
- Nubosidad total
- Tipo de nubes
- Indicador de tiempo presente. Codificación del estado general del tiempo en el instante de la observación según un código de 100 categorías: despejado, niebla, llovizna, lluvia, chubasco, tormenta...

La unidad de medida de la nubosidad es el octa, que representa la octava parte de la bóveda celeste. La nubosidad se cifra 0 en el caso en el que el cielo esté completamente sin nubes y 8 cuando el cielo se presenta totalmente cubierto.

Capítulo 5. Procesado de datos

En el siguiente capítulo se explicará el procedimiento para el tratamiento de los datos recogidos por la baliza satelital Hot Bird 13A junto con las medidas de la estación meteorológica y de las distintas bases de datos. Para ello se ha utilizado el programa MATLAB con el fin de mostrar estadísticas referentes al centelleo troposférico.

En el apartado 5.1 se describirá el proceso empleado en los datos recibidos en la baliza situada en la ETSIT.

En el apartado 5.2 se recoge el procesado de los datos meteorológicos.

5.1. Procesado de datos de la baliza

En este proceso se explicarán todos los pasos seguidos desde la recepción de los datos del satélite hasta la obtención de las diferentes estadísticas.

5.1.1. Almacenamiento de los datos

Mediante el receptor de satélite, se reciben continuamente muestras de la señal a 19,701 GHz del satélite Hot Bird 13A. Estas muestras son recibidas con una frecuencia de 18,66 Hz y se agrupan de manera que cada trama se compone de 32 bytes organizados en 16 palabras cada una. En la tabla siguiente se muestra el significado y los bytes correspondientes a las palabras que se almacenan en los ficheros.

Nº de palabra	Significado	Byte más significativo	Byte menos significativo
1	Frecuencia de conversión	Byte 1	Byte 0
2	Polarización horizontal copolar (fase)	Byte 3	Byte 2
4	Polarización horizontal copolar (cuadratura)	Byte 7	Byte 6
12	Frecuencia del NCO	Byte 23	Byte 22
13	Registro de estado	Byte 25	Byte 24
14	Frecuencia del LO	Byte 27	Byte 26

La información se va almacenando en ficheros de duración igual a una hora. Los ficheros se guardan con una extensión .rx en un PC. Estos ficheros se nombran siguiendo la siguiente nomenclatura:

- “mm” indica el mes. La notación elegida para el mes es la siguiente: en-fe-mr-ab-my-jn-jl-ag-sp-oc-no-di.
- “dd” indica el día.
- “hh” indica la hora.

- “nn” indica los minutos.

Las dos primeras líneas de cada fichero reflejan la fecha y hora del comienzo de los ficheros respectivamente.

5.1.2. Conversión a ficheros de MATLAB

Este procesado efectúa la conversión de ficheros .rx a ficheros .mat para poder ser tratados con MATLAB. También deben de ser eliminados aquellos ficheros dañados o incompletos que no sean de utilidad al no contener información válida. Una vez detectados los tramos inválidos o incompletos se ejecuta la rutina de MATLAB denominado proces1.m, dando como resultado unos ficheros .mat de duración 1 hora que contienen la siguiente información:

- *ph*: nivel de señal copolar (dB).
- *status*: las muestras correctas tienen un valor 1.
- *nco*: frecuencia del NCO.
- *lo*: frecuencia del oscilador local.
- *Fecha de comienzo*: dd/mm/aaaa.
- *Instante de comienzo*: hh:mm:ss.

5.1.3. Clasificación de los tramos

El script proces2.m permite la visualización conjunta de los ficheros .mat (obtenidos tras aplicar el proces1) y del fichero de pluviometría, de cara a efectuar la separación en tramos de lluvia y no lluvia. Generalmente se visualizarán ficheros en tramos de 24 horas, comenzando con el primer fichero de cada día. En el caso de visualizar un evento de lluvia entre el principio y el fin de un día, se deberán procesar 48 horas para evitar la fragmentación de este evento.

El primer paso consiste en limpiar la señal recibida. Para ello se siguen las siguientes opciones:

- Eliminación de las caídas sistemáticas. Estas caídas se deben a las calibraciones periódicas del radiómetro. Se emplea un procedimiento semiautomático que requiere la selección sobre la gráfica de la primera de estas caídas. El operador debe seleccionar el umbral en dB/muestra para la eliminación de estas caídas. Para eventos de no lluvia es habitual utilizar el umbral de 1 dB y para los de lluvia de aproximadamente 2,1 dB para evitar la pérdida de información por filtrado.
- Eliminación manual de espurios: permite eliminar un determinado espurio, con seleccionar la muestra inicial y final del mismo.
- Eliminación de muestras por debajo de un umbral: resulta útil para eliminar valores de señal que quedan por debajo de un determinado umbral. Esta situación suele presentarse tras haber efectuado una eliminación de caídas sistemáticas.

Una vez realizado los anteriores pasos se cargan los datos pluviométricos, visualizándose de forma conjunta los datos de baliza y del pluviómetro de la siguiente forma:

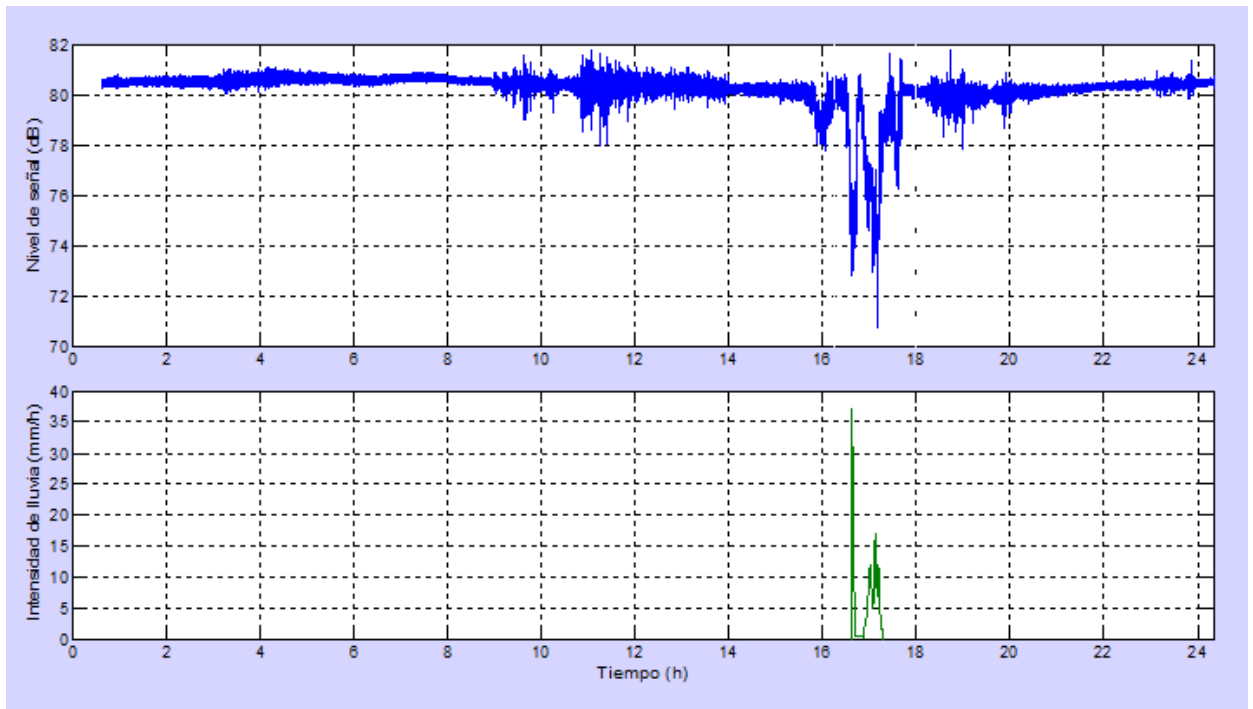


Ilustración 15. Ejemplo de evento de lluvia.

El siguiente paso es clasificar los ficheros en tramos de no lluvia, lluvia y no válidos, atendiendo a la información del pluviómetro. Si no hay información de lluvia se considera un tramo de no lluvia. En el ejemplo de la figura anterior, las líneas rojas delimitan los tramos, distinguiéndose 3 tramos en el evento: dos tramos de no lluvia y uno de lluvia. Es conveniente asegurarse de que se toma la información necesaria de los tramos de lluvia, siendo para ello necesario realizar la separación desde el comienzo de la pendiente de atenuación, hasta el final de la misma.

Una vez se han indicado los tramos de lluvia y no lluvia se procede a escoger únicamente aquellos tramos de no lluvia. Por otra parte se crea un fichero en formato Excel para facilitar la localización de los distintos tramos. En este fichero se especifica el instante de tiempo de comienzo y final del tramo, la existencia de lluvia y comentarios de interés.

Año	Nombre	Mes	Día	Hora	Min	Mes	Día	Hora	Min	Lluvia	Observaciones
2006	20060829T0055-0830T0055	8	29	0	55	8	30	0	55	no	
2006	20060830T0055-0831T0055	8	30	0	55	8	31	0	55	no	
2006	20060831T0055-0901T0055	8	31	0	55	9	1	0	55	no	FIN AGOSTO 2006
2006	20060901T0055-0902T0055	9	1	0	55	9	2	0	55	no	INICIO SEPTIEMBRE 2006
2006	20060902T0055-0903T0056	9	2	0	55	9	3	0	56	no	
2006	20060903T0056-0904T0056	9	3	0	56	9	4	0	56	no	
2006	20060904T0056-0905T0056	9	4	0	56	9	5	0	56	no	
2006	20060905T0056-0906T0056	9	5	0	56	9	6	0	56	no	
2006	20060906T0056-0906T0749	9	6	0	56	9	6	7	49	no	
2006	20060906T1249-0906T1800	9	6	12	49	9	6	18	0	no	
2006	20060906T1800-0906T1917	9	6	18	0	9	6	19	17	si	
2006	20060906T1917-0907T0049	9	6	19	17	9	7	0	49	no	
2006	20060907T0049-0907T0540	9	7	0	49	9	7	5	40	no	
2006	20060907T0540-0907T0900	9	7	5	40	9	7	9	0	si	
2006	20060907T0900-0908T0050	9	7	9	0	9	8	0	50	no	
2006	20060908T0050-0909T0050	9	8	0	50	9	9	0	50	no	

Ilustración 16. Clasificación de los distintos tramos.

Los tramos de no lluvia contienen la siguiente información:

- ph: Nivel de señal del tramo de no lluvia.
- ini_tramo: Instante de inicio del tramo de no lluvia en formato según el comando datenum de MATLAB.

El nombre de los ficheros .mat sigue el formato ISO 8601 (“yyyymmddTHHMM-mmddTHHMM”) donde se especifica el instante de comienzo y fin del tramo.

5.1.4. Detección de espurios

Esta fase es la más crítica, en la que se detectan espurios o restos mal procesados de la señal para eliminarlos. Si bien en el proceso anterior ya se eliminaban espurios, pueden quedar restos inapreciables al ojo al presentarlos en la gráfica pero que gracias a esta fase se pueden observar. Para ello se ejecuta el script *detecta_espurios.m* que realiza la eliminación automática de NaN (Not a Number) y un filtrado paso alto (Butterworth de orden 5, frecuencia de corte de 0,025 Hz). Se presentan tanto el fichero original como el filtrado. El operador debe señalar el comienzo y final de los tramos problemáticos:

- Si el tramo es muy corto (1 o 2 segundos) se puede reasignar a las muestras inválidas un valor constante. De esta manera se evita eliminar el minuto que contiene esas muestras.
- Si el tramo inválido es más largo, se asigna un valor de NaN a las muestras. Posteriormente, las ventanas de 1 min que contengan esas muestras serán completamente excluidas de las estadísticas.
- Los tramos inválidos se guardan en el script *eliminación_tramos.m*

En la figura siguiente se muestra un ejemplo de la eliminación de espurios y filtrado:

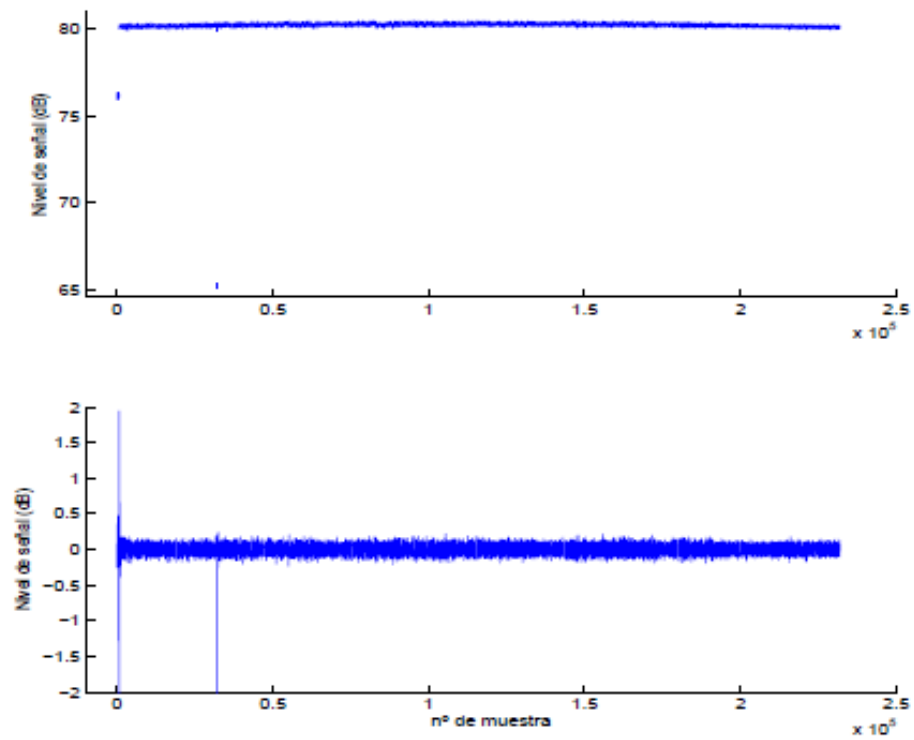


Ilustración 17. Señal con espurio antes y después del filtrado.

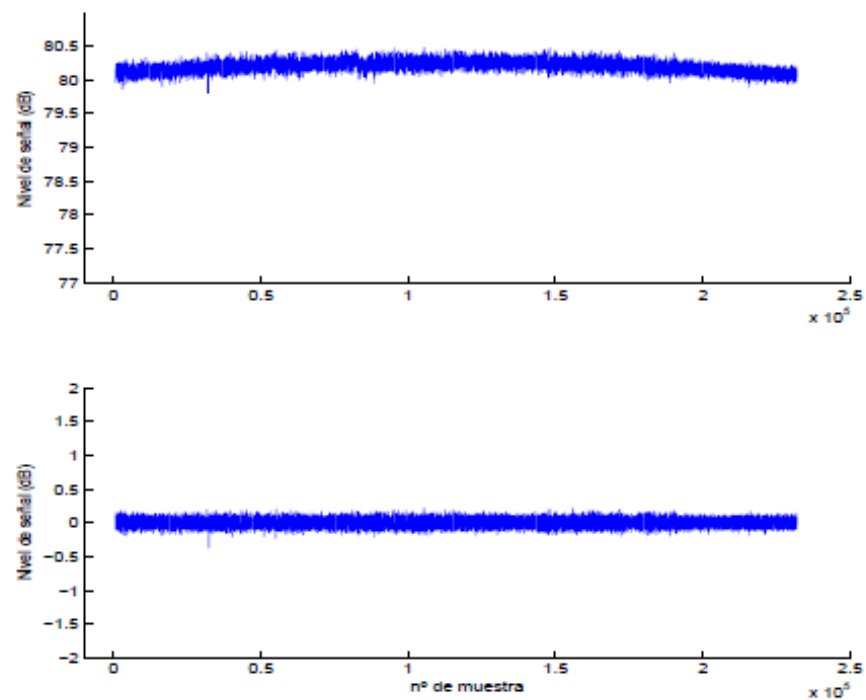


Ilustración 18. Señal tras el proceso de eliminación de espurios antes y después del filtrado.

5.1.5. Cálculo de las distribuciones acumuladas

En este paso se ejecuta el script *da_varianza_y_atenuación.m*, obteniéndose 3 matrices:

- *cuentas_at*: Histograma de atenuación que representa el número de muestras que entran en cada bin de atenuación tanto positiva como negativa, establecido en *bins_at*.
- *cuentas_var*: Histograma de varianza. Contiene el número de ventanas de 1 minuto que entran en cada bin de varianza establecido en *bins_var*.
- *suma_varianza*: Recoge la suma acumulada de la varianza de todas las ventanas. Posteriormente servirá para obtener la varianza media.

5.1.6. Análisis estadístico de las distribuciones acumuladas

Se realiza el análisis estadístico con el script *analiza_da.m*, calculándose las siguientes estadísticas:

- **Varianza media para cada uno de los 7 años:** *media_var_anual*.
- **Varianza para cada uno de los 12 meses:** *media_var_mensual*.
- **Distribuciones acumuladas (DA) de varianza:**
 - *da_anual_var*: Varianzas rebasadas para un conjunto de probabilidades normalizadas. Cada fila corresponde con un año, siendo la fila 8 el año medio.
 - *da_mensual_var*: Varianza media para cada uno de los 12 meses.
 - *da_meses_indiv_var*: Valores de varianza para cada uno de los 84 meses individuales.
- **Distribuciones acumuladas de amplitud:**
 - *da_anual_amplitud_pos*: Valores de amplitud anual positiva (refuerzo) superados para cada probabilidad normalizada.
 - *da_anual_amplitud_neg*: Valores de amplitud anual negativa (atenuación) superados para cada probabilidad normalizada.
 - *da_mensual_amplitud_pos*, *da_mensual_amplitud_neg*: Valores de amplitud mensual media positiva y negativa respectivamente.
 - *da_meses_indiv_amplitud_pos*, *da_meses_indiv_amplitud_neg*: Valores de amplitud positiva y negativa para cada mes individual.
- **Medias de varianza:**
 - *media_var_anual*: Media de varianza anual.
 - *media_var_mensual*: Media de varianza mensual.

5.1.7. Matriz diezminutal

El script *genera_matriz_diezminutal.m* crea una matriz que contiene la media de varianza en periodos de diez minutos. Es la base para la comparativa con parámetros meteorológicos de las distintas bases de datos. Los datos se almacenan en la matriz *matriz_diezminutal.mat* que consta de dos columnas:

- Columna de tiempo en formato MATLAB.
- Columna de varianza media.

5.2. Datos meteorológicos

En este apartado se describirá el proceso seguido para el tratamiento de los datos descargados por las distintas bases de datos meteorológicas, así como el contenido de estos.

5.2.1. Estación meteorológica de la ETSIT

Los datos meteorológicos recogidos por la estación automática se guardan en el fichero *estación_automatica.mat*. Se dispone de información de un periodo comprendido entre el 1 de enero de 2000 hasta el 23 de julio de 2013, sin embargo únicamente se utilizarán los datos correspondientes al periodo de 7 años de estudio (junio de 2006 a julio de 2013). Consta de 9 columnas:

- Columna tiempo expresado en UTC+1 en formato MATLAB.
- Temperatura expresada en °C.
- Humedad relativa, expresada en mm.
- Presión, expresada en milibares (mbar).
- Velocidad del viento, expresada en m/s.
- Dirección del viento expresada en grados. El valor 0 representa la dirección Norte y el Este toma el valor 90.

5.2.2. ERA-Interim

Como se ha comentado anteriormente, ERA-Interim almacena dos tipos de cálculo (forecast o analyses) para el mismo parámetro meteorológico y que deben de ser descargados de manera individual. Además cada uno de ellos presenta distintos intervalos de tiempo:

- Analyses (step 0; times 0, 6, 12 y 18 horas).
- Forecast (steps 3, 9; times 0, 12).

La descarga de datos de ERA-Interim se guarda en ficheros de aproximadamente 250 KB en formato *netCDF* y por lo tanto ha sido necesario procesar los ficheros para poder convertirlos en matrices mat. Una vez tenemos las matrices de los datos forecast y analyses se ejecuta el script *gen_matriz_anyfor.m* para combinar ambas informaciones. El fichero resultante es una matriz con un intervalo de tiempo entre filas de 3 horas y 11 columnas:

- **Fecha:** Columnas 1 a 6 que sigue el siguiente formato AAAA/MM/DD/HH/mm/ss. Expresado en horario UTC.
- **Cálculo del parámetro analizado.** Este puede ser:
 - *Total cloud cover*: Indica el porcentaje de cielo cubierto por nubes.
 - *Low cloud cover*: Porcentaje de cielo cubierto por nubes bajas.
 - *Total column water vapour*: Cantidad de vapor de agua en la atmósfera expresada en kg/m².
 - *Convective available potencial energy*: Exceso de energía debido a la diferencia de temperatura de una corriente ascendente en comparación con la temperatura equivalente del ambiente. Expresada en J/kg.

La posición escogida para la descarga de todos los datos ha sido elegida en función a aquella que fuese estuviese a menor distancia de la ETSIT, resultando esta posición en 40,5º Norte, 3,75º Oeste. Los datos cubren el intervalo de tiempo comprendido entre enero de 2006 hasta julio de 2013, aunque habrá varios meses del año 2006 que no se utilizarán en la realización de este proyecto.

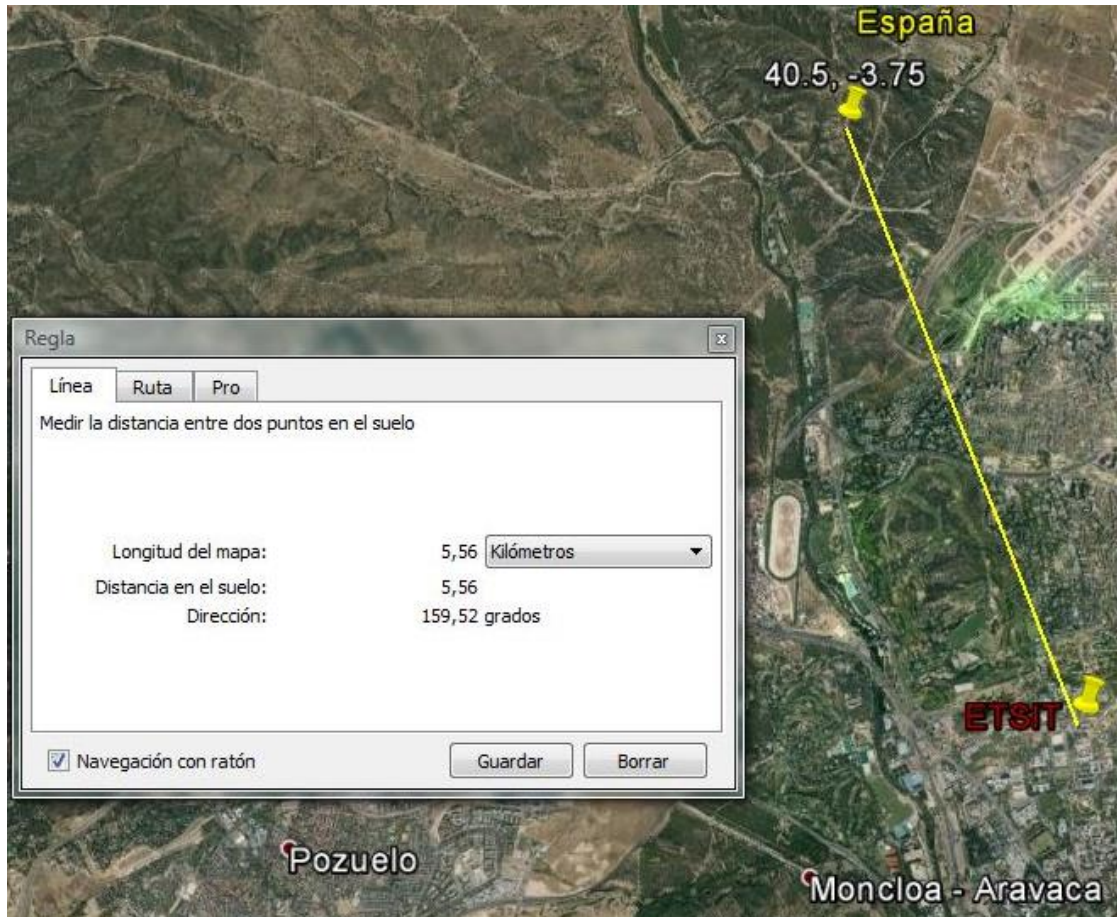


Ilustración 19. Distancia del punto de cálculo a ETSIT.

5.2.3. GNSS

Los datos GNSS pertenecientes a la estación de Villafranca del Castillo han sido previamente procesados por el GTIC-Radiocomunicaciones de la ETSIT. Los datos están guardados en una matriz de 2 columnas:

- **Fecha:** Columna 1. Tiempo de la medida expresado en UTC en formato MATLAB.
- **Vapor de agua integrado:** Columna 2. Expresado en mm.

Estas medidas cubren el periodo aproximado de 2007 a 2012 con un dato cada 5 minutos. La distancia a la estación terrena es de aproximadamente 18 km.

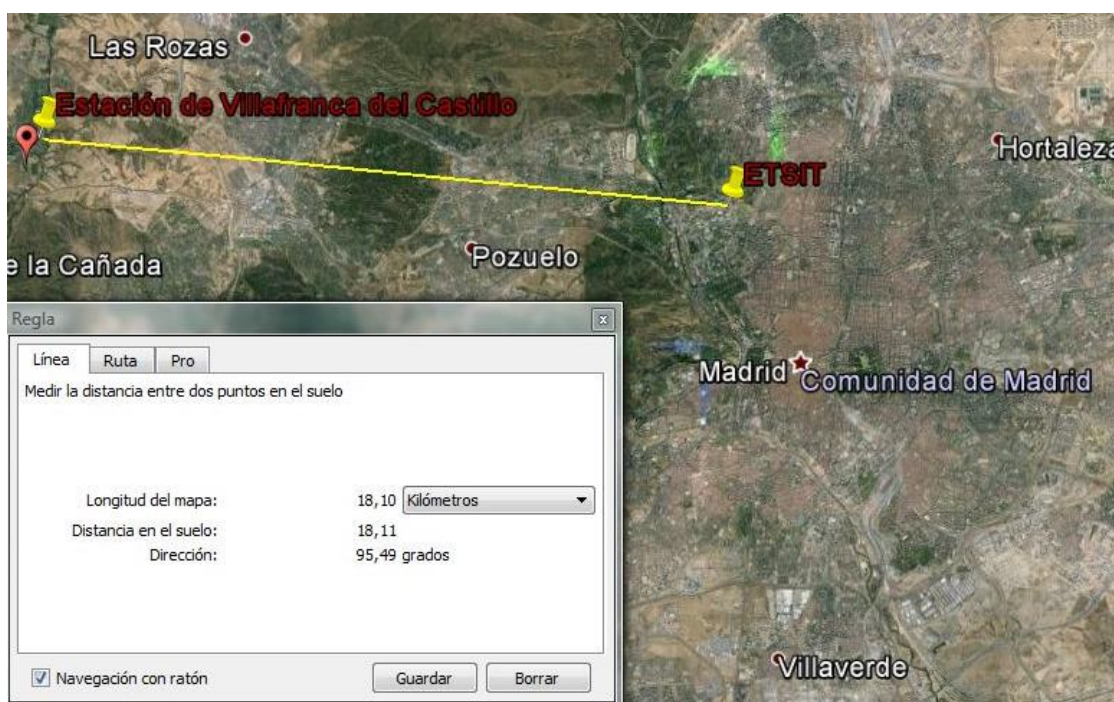


Ilustración 20. Localización de la estación de Villafranca del Castillo.

5.2.4. Datos AEMET

5.2.4.1. Registros históricos

Los registros históricos han sido descargados de la base de datos Ogimet y guardados en formato Excel. Este fichero contiene medidas medias mensuales de presión, temperatura, presión de vapor de agua, precipitación, humedad relativa e índice de refracción del aire. Las medidas pertenecen a la estación de Madrid-Retiro y cubre el periodo de julio de 2006 hasta junio de 2013. La distancia a la estación terrena de la ETSIT es de algo más de 6 km.

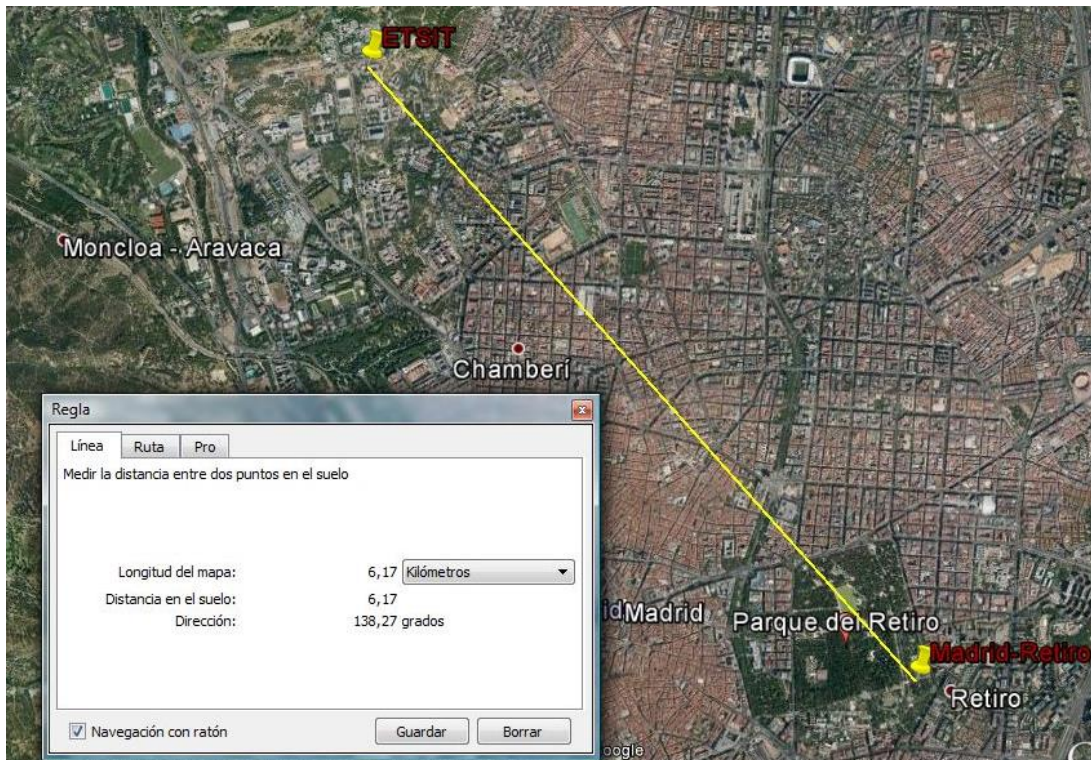


Ilustración 21. Localización de la estación de Madrid-Retiro

5.2.4.2. SYNOP

Los datos sinópticos ya han sido procesados previamente, las medidas pertenecen a la estación de Madrid –Barajas con un dato cada 6 horas. Algunas de las informaciones más importantes de la matriz *madrid_datos_synop.mat* son las siguientes:

- *Tiempo absoluto*: Tiempo absoluto expresado en UTC en formato datenum. Columna 1
- *Fecha*: AAAA/MM/DD/HH. Comprendida entre las columnas 2 a 5.
- *Temperatura del aire (°C)*. Columna 6
- *Temperatura de rocío (°C)*. Columna 7.
- *Presión (mb)*. Columna 8.
- *Dirección del viento*. Columna 11.
- *Velocidad del viento (km/h)*. Columna 12.
- *Nubosidad total (octas)*. Columna 13.
- *Nubosidad de una capa (octas)*. Columna 14.
- *Capa a la que hace referencia la columna 14*. Bajas (1), medias (2), altas (3). Columna 15.
- *Tipos de nubes bajas*. Código Warren (ver tabla). Columna 23.
- *Cantidad de nubes bajas (octas)*. Columna 24.
- *Tipos de nubes medias*. Código Warren (ver tabla). Columna 25.
- *Cantidad de nubes medias (octas)*. Columna 26.
- *Tipos de nubes altas*. Código Warren (ver tabla). Columna 27.

Código Warren	-1	0	1	2	3	4	5
Tipo de nube	Sin información	Sin nubes	Sin nubes bajas	Cumulos	Cumulonimbos	Estratos	Estratocúmulos

Código Warren	6	7	8	9	10	11
Tipo de nube	Nimboestrato	Altoestrato	Altocúmulo	Cirroestrato	Cirro o Cirrocúmulo	Cirros densos

La distancia a la estación de la ETSIT es de 14,9 km.

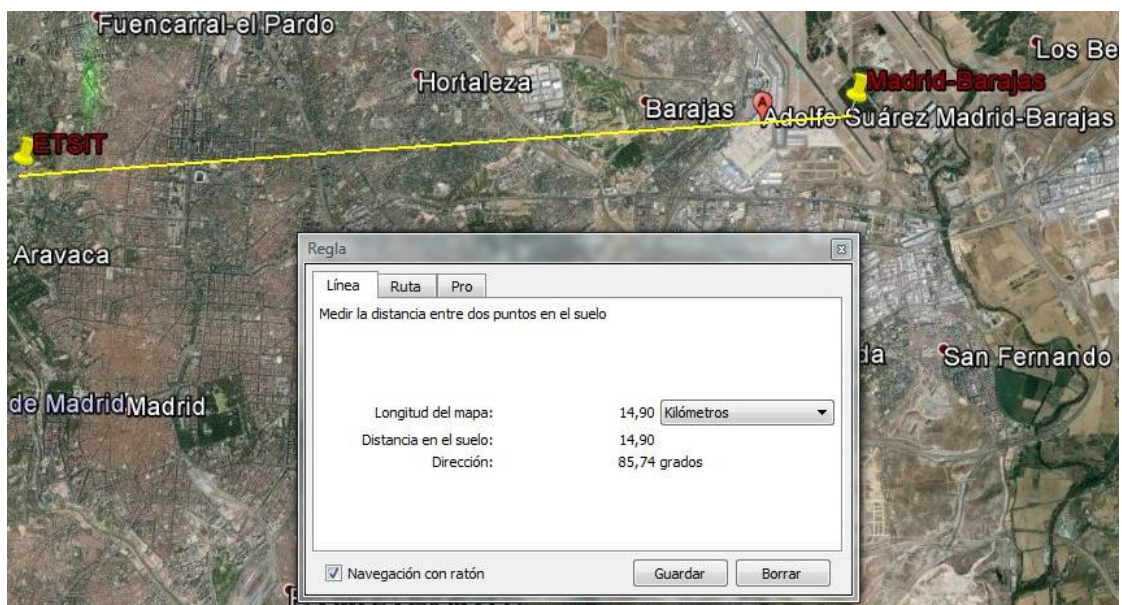


Ilustración 22. Localización de la estación de Madrid-Barajas.

Capítulo 6. Resultados de centelleo.

En este capítulo se mostrarán los resultados del centelleo troposférico seco. En primer lugar se presenta un evento de centelleo capturado durante el estudio. En el apartado 6.2 se presentarán las medidas de varianza de centelleo que es el parámetro más usado para caracterizar su intensidad. A continuación se mostrarán las correlaciones con varios parámetros meteorológicos. En el apartado 6.4 se mostrarán los resultados de los modelos de predicción analizados.

6.1 Ejemplo de un evento de centelleo

El centelleo, presente en todo momento en la recepción de la señal, sucede durante algunos periodos de tiempo con intensidad más elevada. A estos periodos se les suele llamar eventos de centelleo, en los que la varianza supera un determinado valor umbral. Generalmente el centelleo no supera 1 dB de amplitud, pero existen escasos instantes en los que se logra superar 2 dB de intensidad.

En la siguiente gráfica perteneciente al mes de junio de 2013 se observa un evento de centelleo. En este caso se existe una variación con respecto a su valor medio de 1 dB positivos (refuerzo) y superando 2 dB negativos (atenuación). Estos casos en los que existen estas variaciones tan bruscas no son frecuentes y a lo largo de la realización solo se han observado una treintena de ellos.

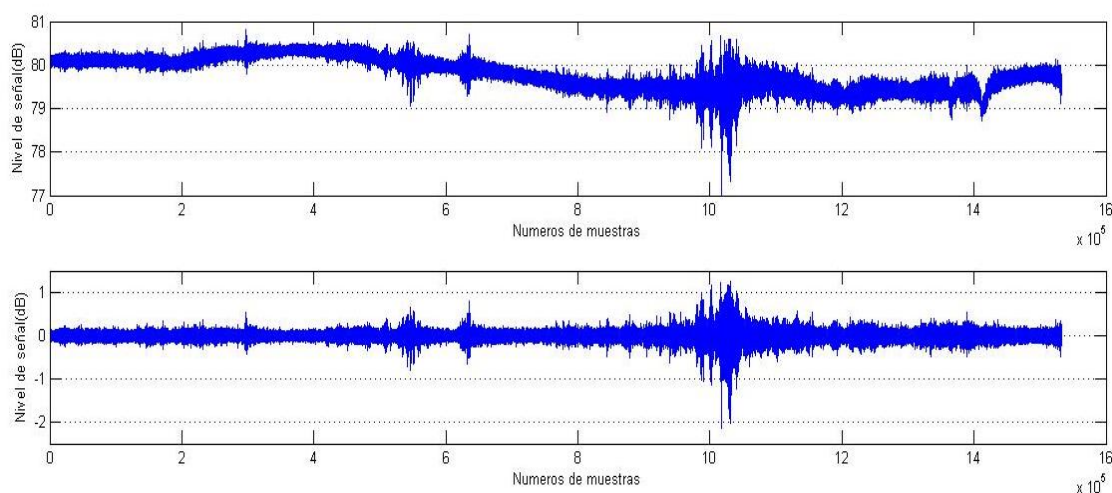


Ilustración 23. Evento de centelleo del 5 de junio de 2013. Señal original y filtrada.

6.2. Varianza

El parámetro más utilizado en publicaciones para medir la intensidad de centelleo es la varianza. Se calcula como el cuadrado de la desviación típica en ventanas de un minuto, en este PFG se ha calculado en ventanas de un minuto (1119 muestras) que se desplazan cada 18 muestras. Como se ha comentado anteriormente cada año de estudio empieza en el mes de julio y termina en junio del año siguiente.

6.2.1. Varianza mensual.

Se puede apreciar una fuerte variabilidad estacional, en la que los mayores niveles de varianza corresponden con los meses de junio, julio y agosto. Esto es debido a una gran dependencia de la varianza con los parámetros meteorológicos como la temperatura, índice de refracción húmedo y nubosidad.

En la figura 24 se presenta la variabilidad de varianza mensual en cada año de estudio, el mes 1 del año 1 corresponde con enero del periodo 2006-2007 (enero de 2007). La diferencia de varianza entre los meses de verano y los de invierno puede llegar a ser superior a cuatro veces su valor, siendo la máxima diferencia de 0,0075 dB².

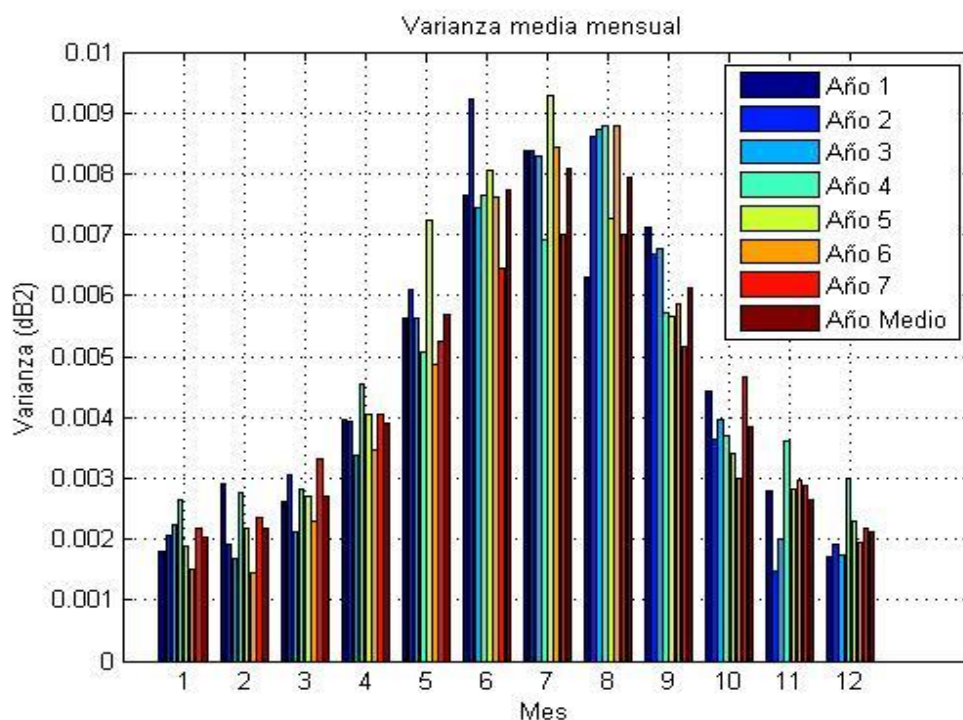


Ilustración 24. Varianza mensual media por años.

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año medio
Enero (1)	0,0018	0,0021	0,0022	0,0027	0,0019	0,0015	0,0022	0,002
Febrero (2)	0,0029	0,0019	0,0017	0,0028	0,0022	0,0015	0,0024	0,0022
Marzo (3)	0,0026	0,0031	0,0021	0,0028	0,0027	0,0023	0,0033	0,0027
Abril (4)	0,004	0,0039	0,0034	0,0045	0,0041	0,0035	0,004	0,0039
Mayo (5)	0,0056	0,0061	0,0056	0,0051	0,0072	0,0049	0,0052	0,0057
Junio (6)	0,0076	0,0092	0,0074	0,0077	0,0081	0,0076	0,0064	0,0077
Julio (7)	0,0084	0,0084	0,0083	0,0069	0,0093	0,0084	0,007	0,0081
Agosto (8)	0,0063	0,0086	0,0087	0,0088	0,0073	0,0088	0,007	0,0079
Septiembre(9)	0,0071	0,0067	0,0068	0,0057	0,0057	0,0059	0,0052	0,0061
Octubre(10)	0,0044	0,0037	0,004	0,0037	0,0034	0,003	0,0047	0,0038
Noviembre (11)	0,0028	0,0015	0,002	0,0036	0,0028	0,003	0,0029	0,0026
Diciembre (12)	0,0017	0,0019	0,0017	0,003	0,0023	0,0019	0,0022	0,0021

Tabla 1. Valores de varianza mensual media por años.

6.2.2. Variabilidad anual.

La variabilidad anual se mantiene casi constante a lo largo del periodo de estudio. Esto es debido a la constante presencia de los efectos meteorológicos y a la escasa variación en la intensidad de dichos efectos.

En la figura 25 se muestra la varianza anual media para los 7 años de estudio. Se puede apreciar la similitud entre sus valores, obteniéndose el máximo en el cuarto año.

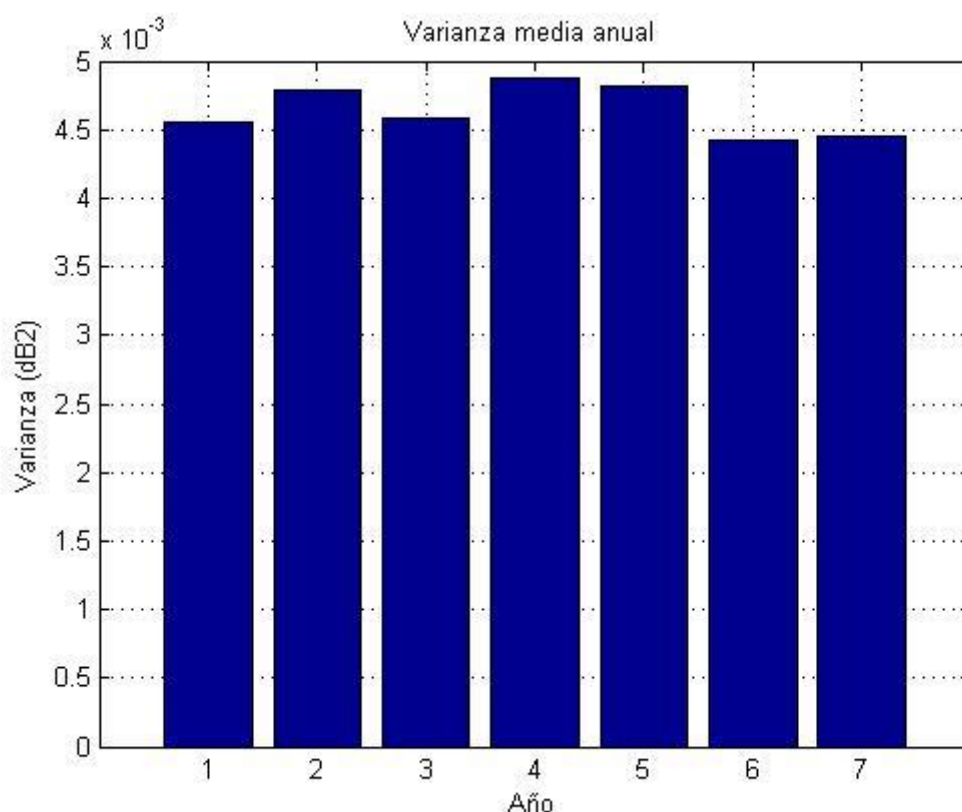


Ilustración 25. Varianza media anual.

6.3. Distribuciones acumuladas de varianza y amplitud

Para un operador de telecomunicaciones el dato más significativo es la intensidad superada para un determinado porcentaje de tiempo, es decir, la distribución acumulada. En este apartado se estudiarán las distribuciones acumuladas de varianza y de amplitud. Dado que el espectro no es simétrico la distribución acumulada de amplitud puede ser positiva (ganancias) o negativas (atenuaciones).

Las distribuciones acumuladas se estudiarán para distintos periodos de tiempo, aunque los más significativos son para un mes y para un año.

6.3.1. Distribución acumulada de varianza

6.3.1.1. Distribuciones mensuales de varianza

En la figura 26 se presenta la distribución acumulada mensual de varianza media. Destaca la gran estacionalidad de la varianza mensual de centelleo con valores que comprenden desde los $0,29 \text{ dB}^2$ en el mes de julio a los $0,043 \text{ dB}^2$ en el mes de diciembre para el 0,01% de tiempo.

Para porcentajes por debajo del 1 % de tiempo, el mes con una mayor intensidad de centelleo es agosto seguido de junio y julio con valores casi idénticos entre ambos para todos los porcentajes de tiempo. Por otro lado hay cinco meses que presentan una curva casi plana coincidiendo con los meses más fríos del año (noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo), indicando que apenas hay variaciones fuertes de la señal causadas por el centelleo en ausencia de lluvia.

Hay que destacar el comportamiento de la distribución acumulada de varianza que aunque no es idéntico si se asemeja a la evolución de varianza mensual media. Estas pequeñas diferencias entre los porcentajes más pequeños de tiempo pueden deberse a la presencia de nubes en la atmósfera, ya que son estos fenómenos los que presentan mayores intensidades.

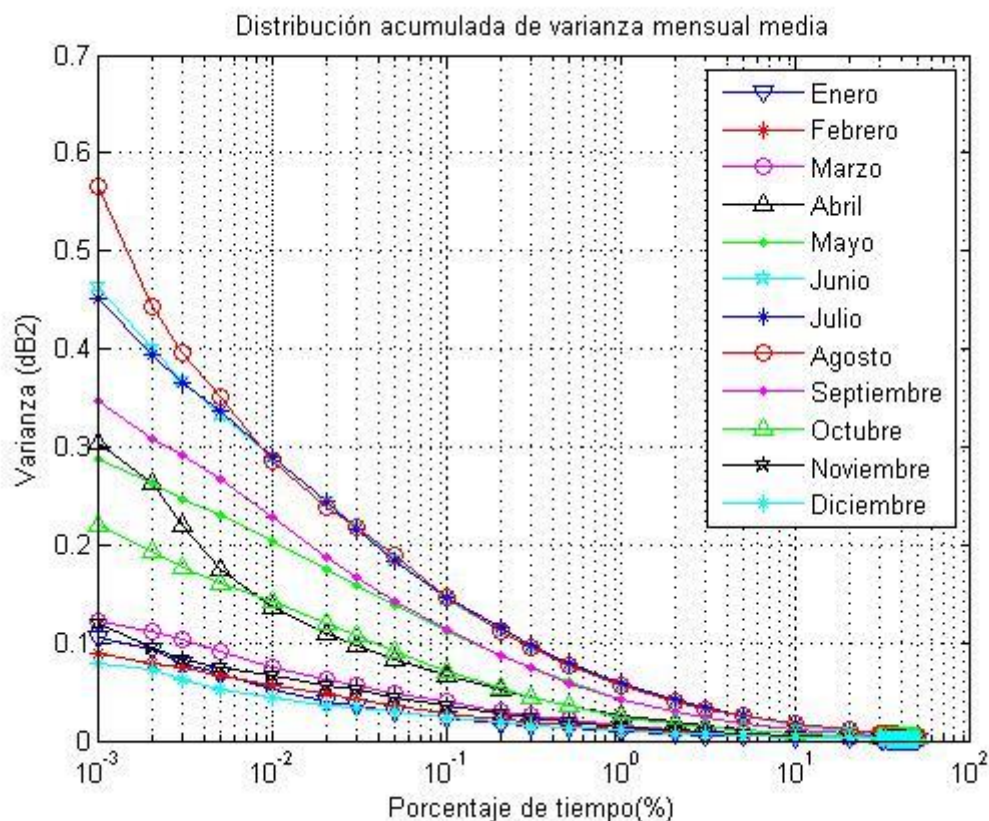


Ilustración 26. DA de varianza mensual media.

6.3.1.2. Distribuciones anuales de varianza

La distribución acumulada de varianza anual en ausencia de precipitación se presenta en la ilustración 27. La curva presenta un comportamiento exponencial negativa, con una variación fuerte para valores menores al 0,1% del tiempo. El valor máximo medio no supera los 0,37 dB² para el menor porcentaje de tiempo analizado, sin embargo no ocurre lo mismo con el segundo año que llega casi a los 0,5 dB² para el 0,001% del tiempo. Se confirma una variabilidad anual que no resulta despreciable para porcentajes de tiempo inferiores al 0,01%.

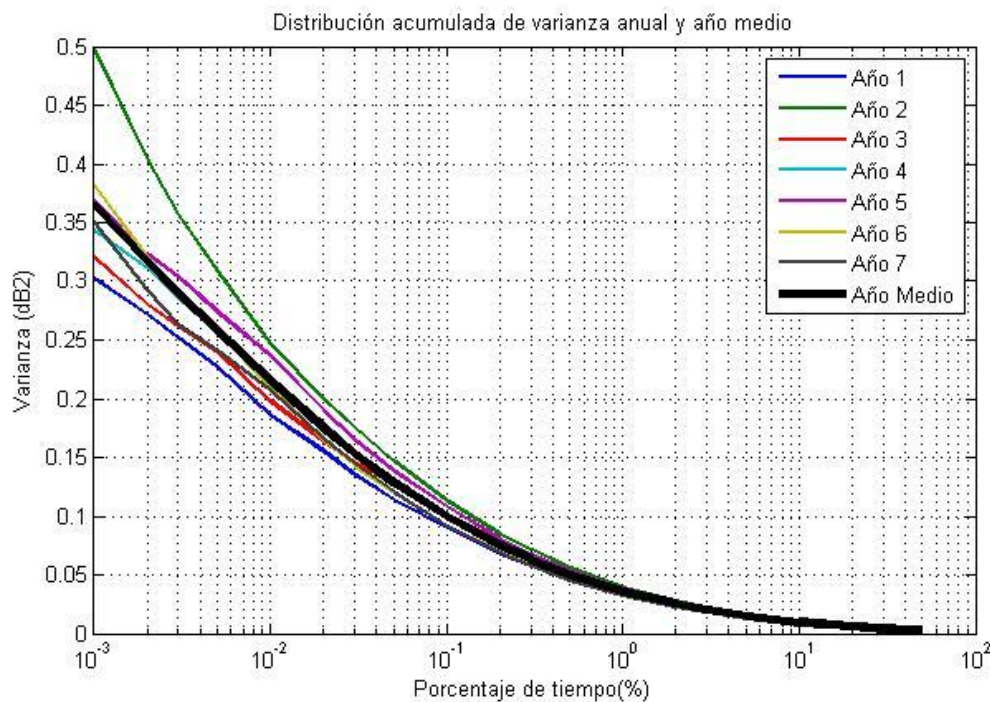


Ilustración 27. DA de varianza anual.

6.3.2. Distribución acumulada de amplitud: atenuación y ganancia

La distribución acumulada de amplitud permite observar el porcentaje de tiempo para el cual se supera un determinado umbral de amplitud. Aunque las fluctuaciones rápidas positivas de la señal pueden ocasionar problemas a los sistemas de modulación, las fluctuaciones negativas también producen pérdidas de la señal, siendo por tanto estas últimas de mayor importancia para un operador. Además comparando ambas distribuciones se puede observar la asimetría que presenta el centelleo.

6.3.2.1. Distribuciones acumuladas de amplitud mensuales

A continuación se exponen las gráficas correspondientes a las distribuciones acumuladas de amplitud mensuales medias. Tal y como ocurre con la varianza los mayores valores de atenuación se dan para los meses más cálidos, teniendo el máximo en el mes de agosto seguido por el de julio. Esto puede ser debido a la gran dependencia del centelleo con la temperatura.

Ambas distribuciones tienen comportamientos muy parecidos, sin embargo para porcentajes menores al 0,3 % del tiempo los valores de atenuación son ligeramente mayores que los obtenidos en las DA de ganancia. Resulta interesante observar cómo las distribuciones acumuladas de los distintos meses aparecen generalmente representadas en grupos de dos o tres, debido probablemente a la gran similitud de los factores climatológicos entre dichos meses.

En cuanto a la magnitud de las fluctuaciones la ganancia consigue superar los 0,16dB, mientras que la atenuación logra superar los 1,25 dB. Se han registrado eventos de centelleo de intensidades muy elevadas, por encima de los 2 dB, sin embargo, estos casos son muy escasos representando unos pocos minutos en el total de los 7 años de estudio.

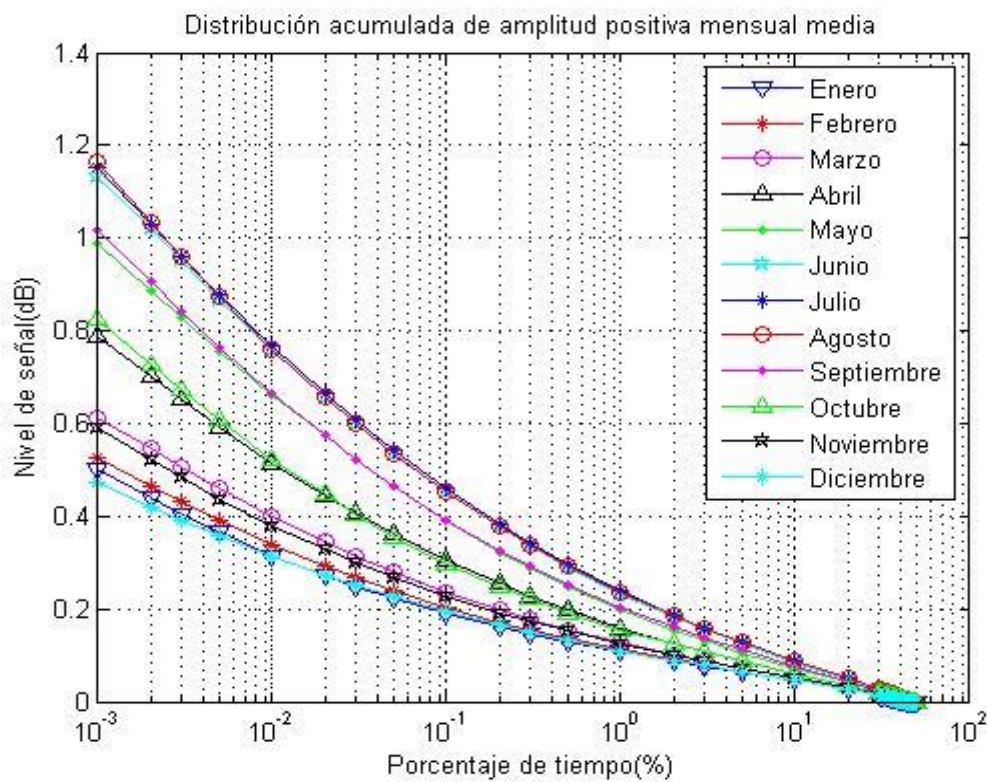


Ilustración 28. DA de amplitud positiva mensual media.

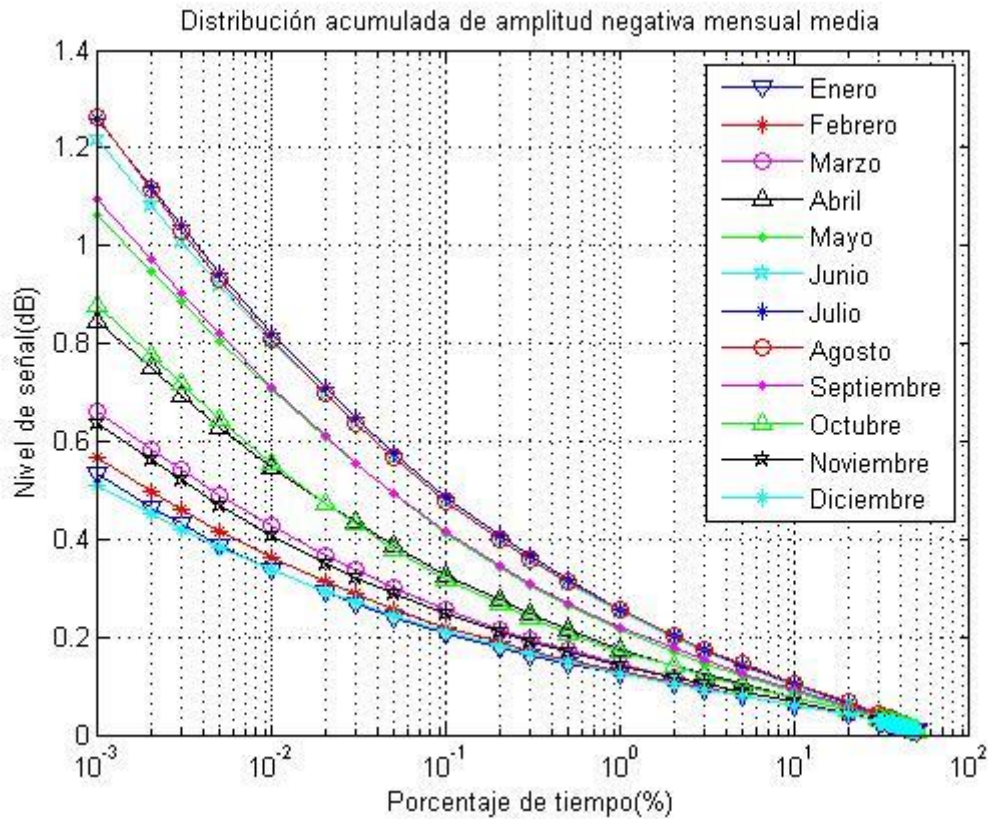


Ilustración 29. DA de amplitud negativa mensual media.

6.3.2.2. Distribuciones acumuladas de amplitud anuales

En las ilustraciones 30 y 31 se presentan las gráficas correspondientes a las distribuciones acumuladas de ganancia y atenuación anuales medias. Los 7 años estudiados tienen un comportamiento muy parecido entre sí, siendo casi idéntico por encima del 0,3% del tiempo. Ambas distribuciones terminan en el 50 % del tipo por lo que en la mitad del tiempo se registran atenuaciones y en la otra mitad ganancias. La distribución acumulada de ganancia y la de atenuación son muy parecidas para un porcentaje superior al 0,03 % del tiempo; sin embargo, la distribución de atenuación presenta valores mayores para porcentajes menores. La diferencia es máxima para el 0,001% del tiempo siendo esta de 0,0708 dB.

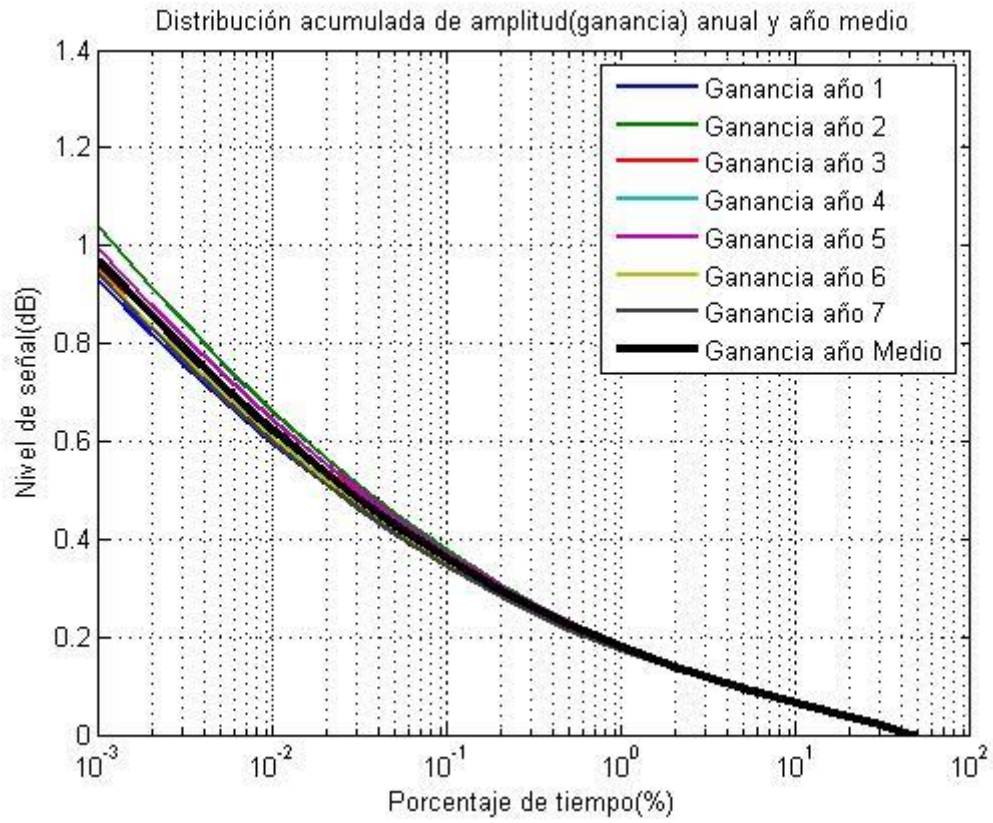


Ilustración 30. DA de atenuación anual media

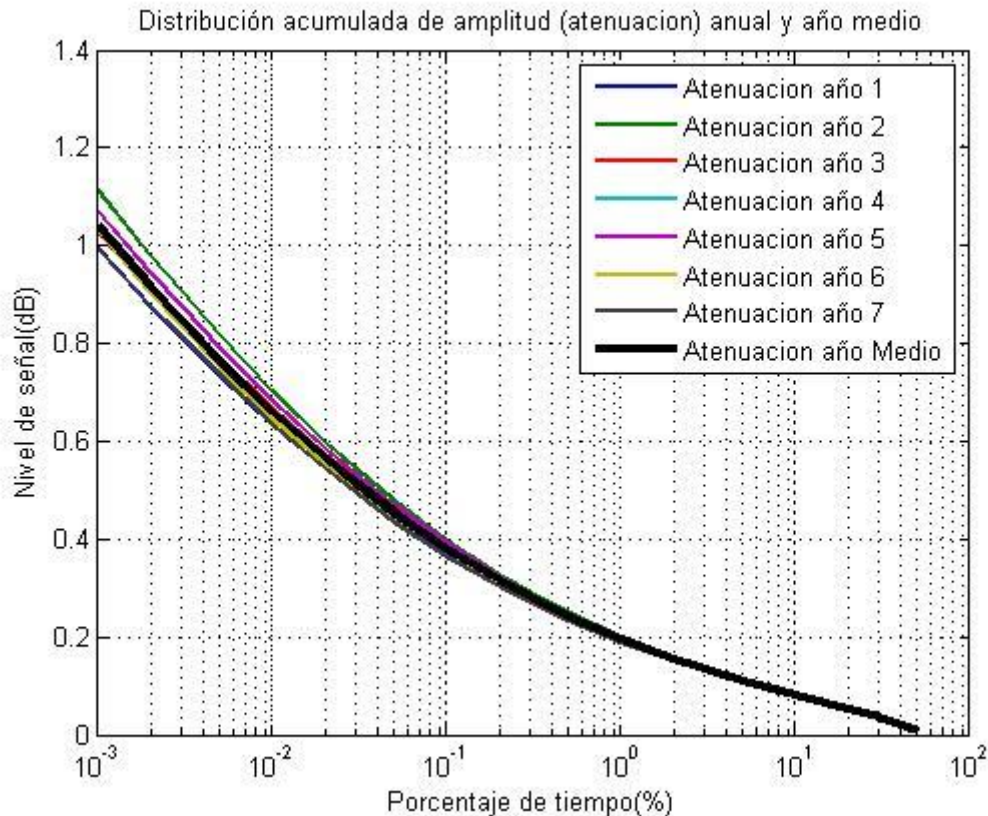


Ilustración 31. DA de amplitud negativa anual media

6.4. Correlación con parámetros meteorológicos

En este apartado se estudiará la dependencia de la varianza de centelleo con diversos parámetros meteorológicos. El estudio de la correlación con los parámetros meteorológicos puede ser de gran ayuda para estimar la intensidad de centelleo a corto plazo. Esto resulta de utilidad para técnicas FMT, ayudando a mitigar el efecto de las fluctuaciones rápidas de la señal.

Los datos de varianza han sido integrados a 30 minutos alrededor de la hora de recogida del parámetro meteorológico (1 hora de integración), salvo para aquellos capturados por la estación automática, reduciendo el intervalo a 10 minutos alrededor del dato de recogida. Esta reducción en el tiempo de integración se debe a la menor distancia entre la estación meteorológica y la estación terrena.

Los datos obtenidos desde el GNSS y desde la estación automática de la ETSIT resultan muy útiles debido a la gran cantidad de información recogida con respecto a las otras bases de datos. Sin embargo, surge un problema al analizar los datos de la ETSIT, ya que existen periodos de tiempo en los que los datos no están disponibles:

- Desde el 6 de septiembre al 20 de octubre de 2006.
- Desde el 26 de febrero de 2007 al 23 de mayo de 2007
- Los días 25 de abril de 2008, 23 de abril de 2011, 3 y 4 de julio de 2012.

Los tres primeros apartados están medidos por la estación automática de la ETSIT. En ellos se analizan los parámetros de temperatura, humedad absoluta y relativa, índice de refacción húmedo y presión. En estos apartados a su vez se muestran los valores mensuales medios recogidos por la estación de AEMET-Retiro, que nos dará una idea más clara de la evolución de dichos parámetros con la fluctuación de la varianza a más largo plazo.

El cuarto punto muestra el análisis realizado con el viento. Se estudiarán dos parámetros: la velocidad y la dirección del viento, ambos obtenidos en la estación meteorológica de la ETSIT.

El apartado quinto trata el análisis de la cantidad de vapor de agua integrado en columna vertical (IWVC y TCWV) obtenido desde el GNSS y ERA-Interim respectivamente.

En el apartado se estudia el efecto del parámetro *Convective available Potential Energy* sobre la señal. Está obtenido desde la base de datos de ERA-Interim.

Por último, en el séptimo apartado se analizan diversos parámetros referidos a la nubosidad. Los parámetros *Total cloud cover* y *Low cloud cover* han sido obtenidos desde ERA-Interim. Por otro lado se dispone de datos SYNOP que proporcionarán información adicional.

6.4.1. Temperatura

En este apartado se estudiará la relación entre varianza y temperatura. En el primer apartado se analizarán los datos obtenidos por la estación automática de la ETSIST.

En la Ilustración 48 se aprecia como la varianza media sigue la tendencia marcada por la temperatura. Un aumento de la temperatura media mensual se traduce en un aumento de la varianza media.

El máximo lo obtenemos en el mes de julio con una temperatura media de 27 °C, seguido de cerca del mes de agosto. A medida que nos alejamos de estos dos meses se produce un descenso brusco de las temperaturas encontrando mínimos en enero y diciembre.

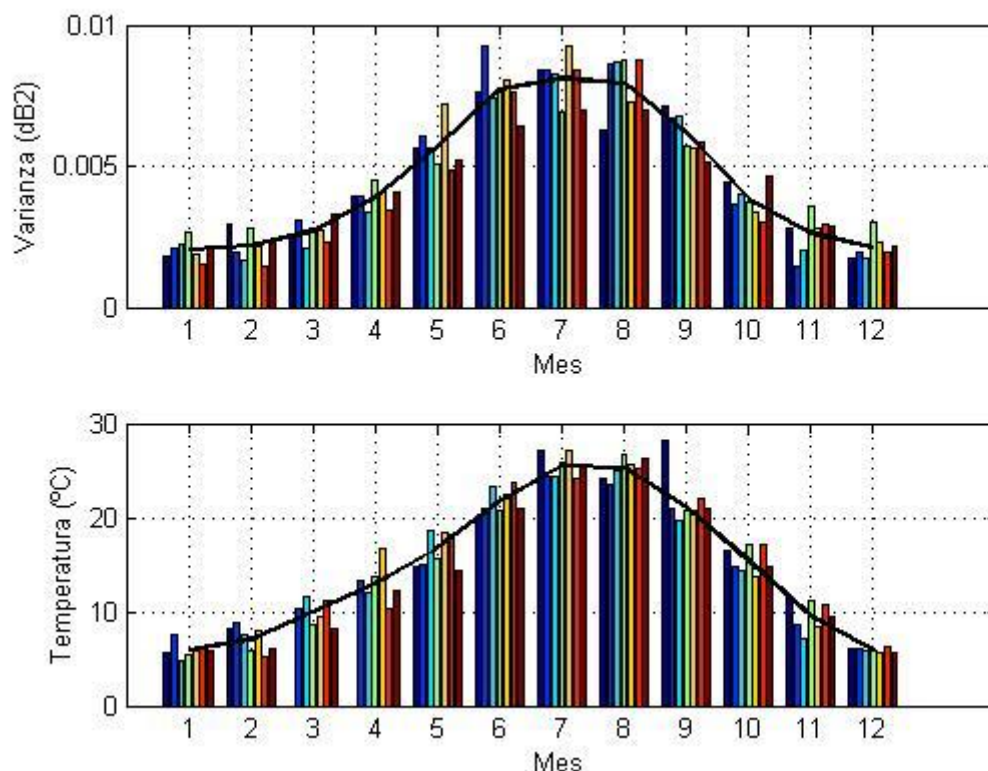


Ilustración 32. Varianza mensual media y temperatura mensual media.

La ilustración 33 muestra la correlación entre varianza y temperatura. Por un lado se han representado los valores instantáneos de cada muestra y los valores mensuales medios. Entre los valores “instantáneos” se aprecia un aumento de la dispersión a medida que se aumenta el valor de las variables, por ello se ha decidido representar los percentiles 90 % y 10 %. El área encerrada entre estos dos percentiles recoge el 80% de las muestras totales del experimento, lo que nos indica una idea más clara de la correlación.

La relación entre varianza y temperatura se puede apreciar mejor con el coeficiente de correlación, siendo este de 0,5976. La temperatura, como se verá posteriormente, es el parámetro meteorológico que mejor caracteriza la intensidad centelleo.

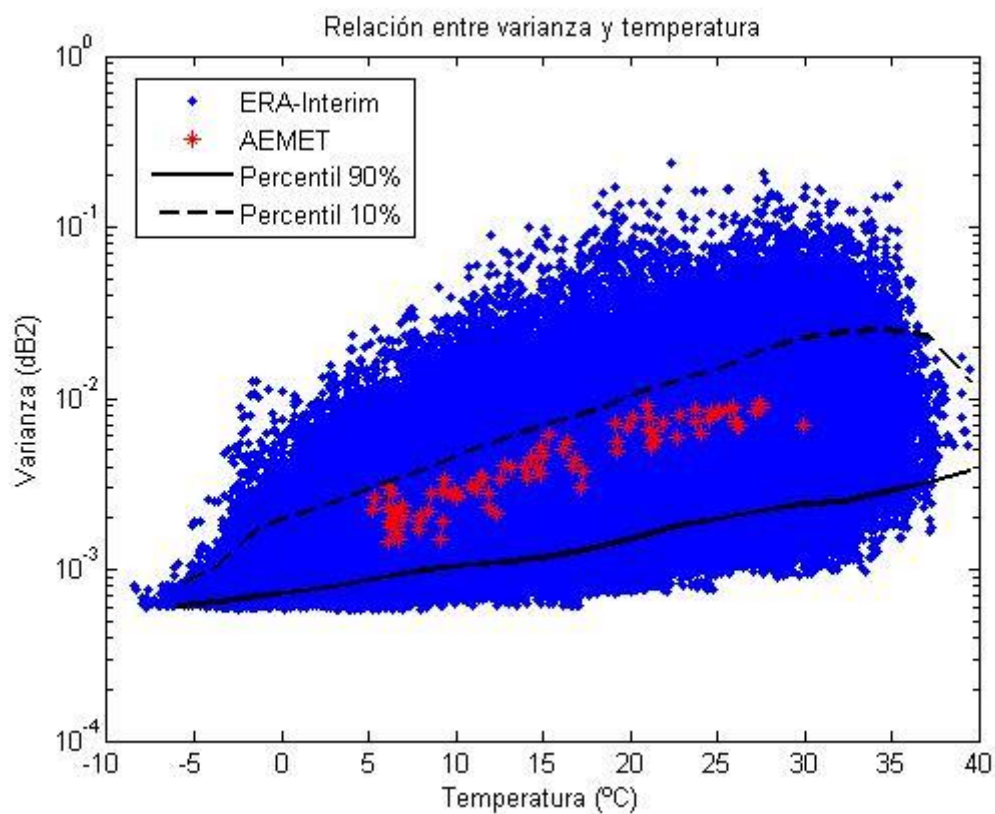


Ilustración 33. Varianza media en función de la temperatura.

Parámetros	Coefficiente de correlación
Varianza-Temperatura	0,5976

6.4.2. Humedad Relativa, Humedad Absoluta, Nwet.

La siguiente ilustración muestra la varianza media con respecto a tres parámetros meteorológicos que están relacionados entre sí: humedad relativa (HR), humedad absoluta (HA) e índice de refracción húmedo (Nwet). Tanto la humedad absoluta como el índice de refracción húmedo siguen una tendencia casi idéntica entre sí, obteniendo unos valores más altos en los meses de verano tal y como ocurre con la varianza. Esto no sucede con la humedad relativa que tiene un comportamiento contrario a los anteriores, es mayor en los meses de invierno y menor en los de verano, obteniendo un mínimo muy pronunciado en el mes de junio.

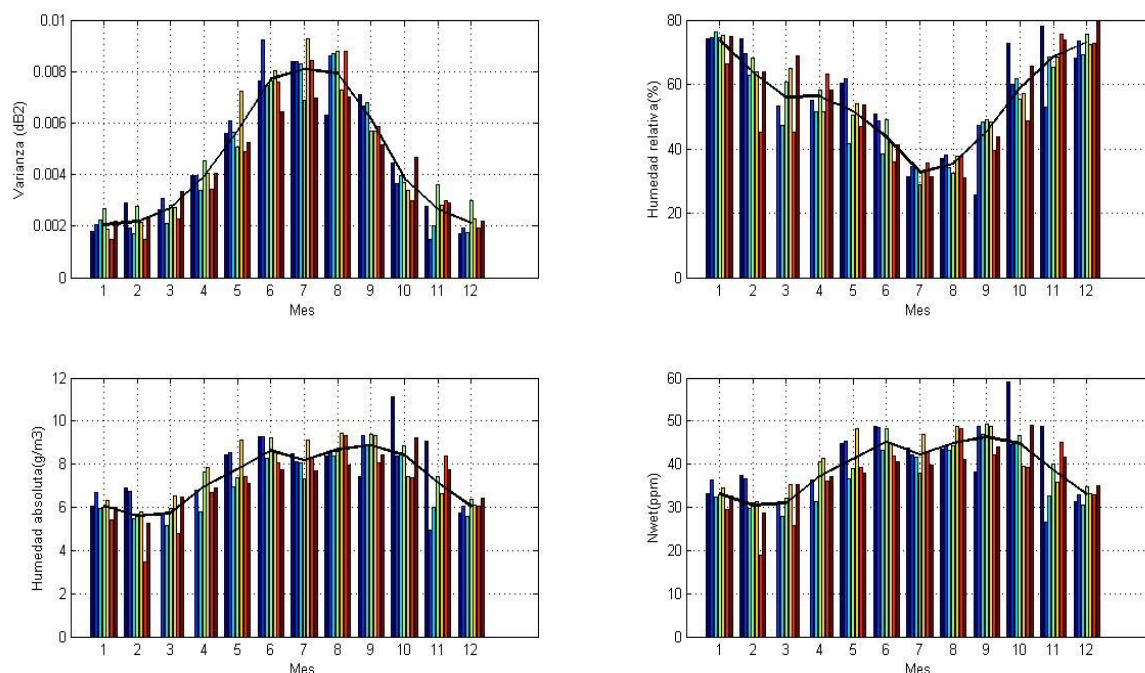


Ilustración 34. Varianza, HR, HA y Nwet medio.

El comportamiento de la humedad absoluta y el índice de refracción húmedo se traducen en una correlación positiva con la varianza, siendo casi idénticos en ambos casos. Esto se debe a una estrecha relación entre ambos parámetros, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura. La humedad relativa en cambio muestra una correlación negativa débil, -0,32. Puede afirmarse que este es un parámetro que no nos aporta información de centelleo. La causa para esta correlación se debe a la disminución de la humedad relativa a medida que la temperatura aumenta, propio de los climas continentales secos como es el caso de Madrid.

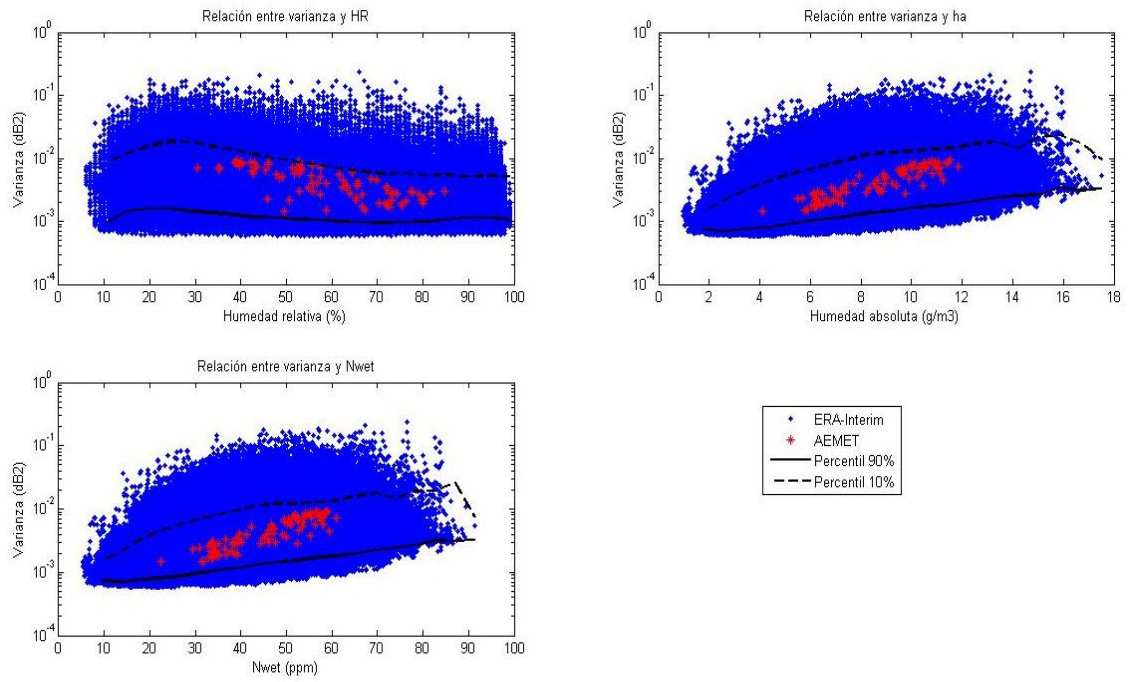


Ilustración 35. Relación entre varianza y 3 parámetros meteorológicos.

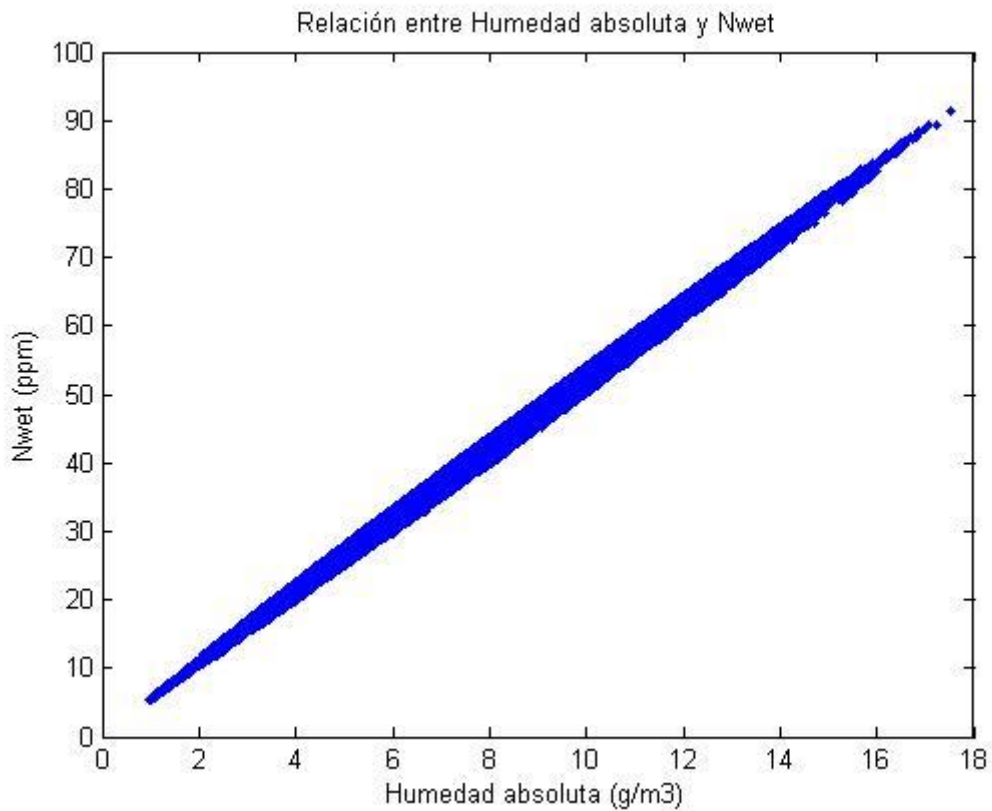


Ilustración 36. Correlación entre Nwet y humedad relativa.

Parámetros	Coeficiente de correlación
Varianza-Humedad relativa	-0,3266
Varianza-Humedad absoluta	0,4092
Varianza-Nwet	0,3760
Nwet-Humedad absoluta	0,9976

6.4.3. Presión atmosférica

La figura 37 muestra la varianza media junto a la presión atmosférica media de cada mes de estudio. No se aprecia ninguna relación entre ambas magnitudes, ya que durante la mayoría de los meses tiene una curva casi plana, obteniéndose un mínimo en el mes de abril.

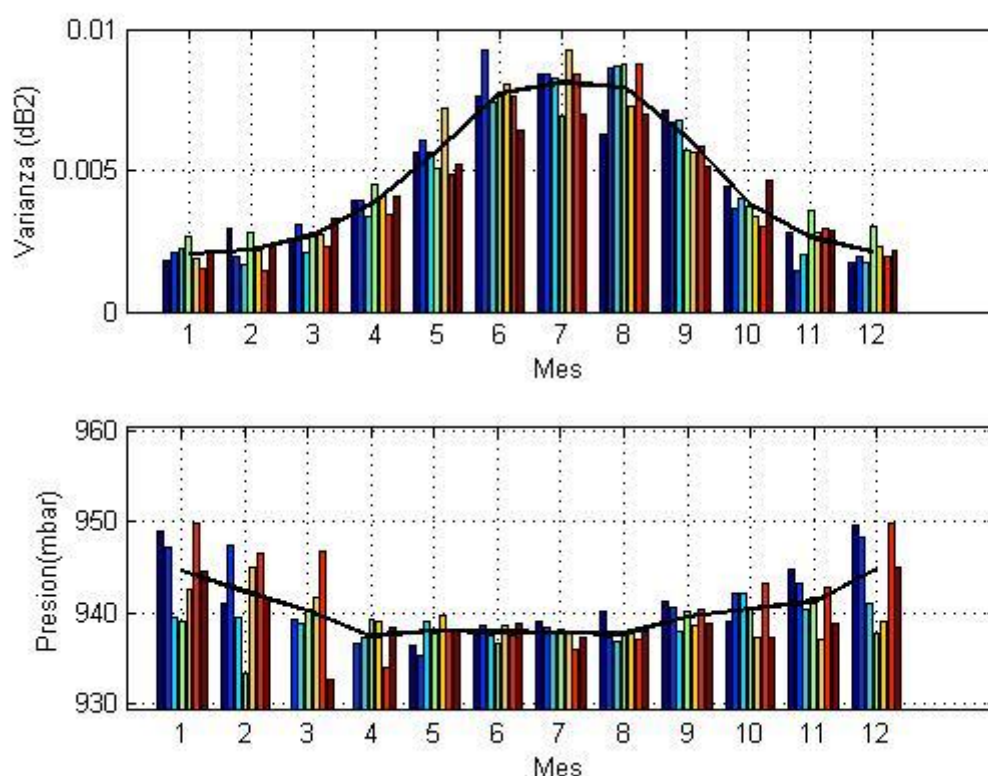


Ilustración 37. Varianza media y presión atmosférica media.

En la figura 38 se observa la relación entre varianza y presión. Como era de esperar se obtiene una escasa correlación -0,3619. Sin embargo se aprecia un máximo pronunciado en torno a los 940 mbar. Por otro lado es en este valor donde se obtiene una mayor cantidad de muestras y donde se han recogido los valores de presión más pequeños. Debido a la escasa correlación con la varianza, la presión no es un buen caracterizador del centelleo.

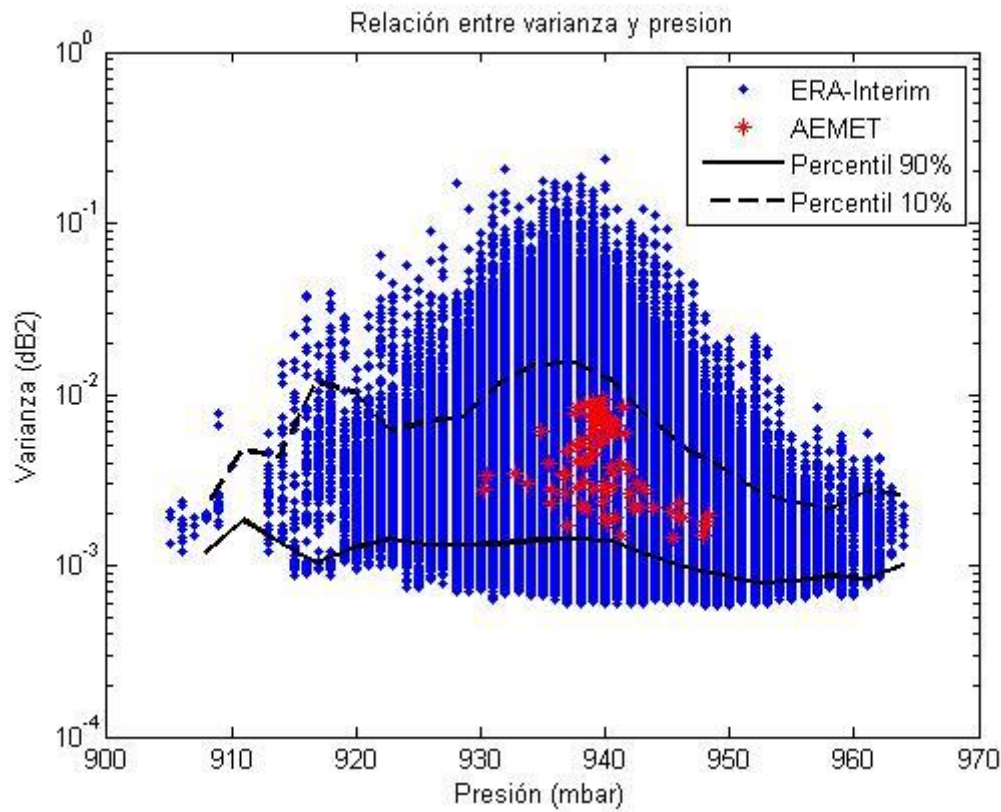


Ilustración 38. Relación entre varianza y presión.

Parámetros	Coefficiente de correlación
Varianza-Presión atmosférica	-0,3619

6.4.4. Velocidad y dirección del viento

La ilustración 39 muestra la varianza junto a la velocidad media del viento. No se observa una clara similitud entre la tendencia seguida por la varianza y la velocidad. La velocidad entre los distintos meses del año es claramente no uniforme con grandes variaciones entre los distintos años, sin seguir un patrón determinado.

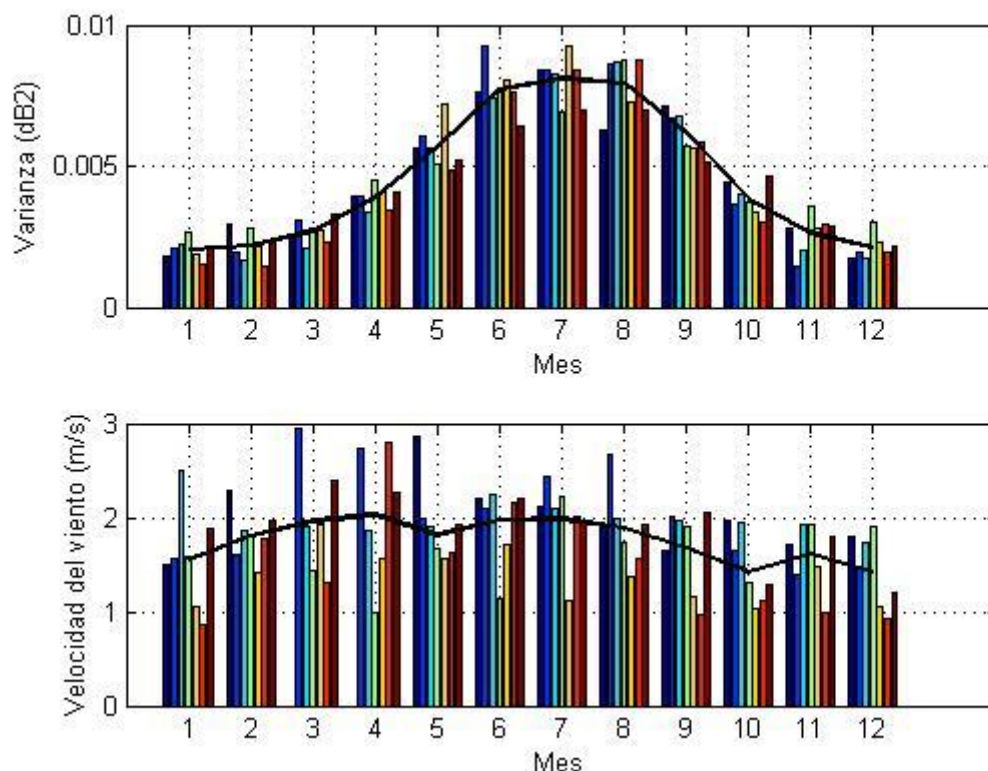


Ilustración 39. Varianza media y velocidad del viento media

La siguiente figura confirma una débil correlación del centelleo con la velocidad del viento. El coeficiente de correlación de 0,2179 es muy inferior a otros parámetros analizados. Paralelamente se ha analizado el efecto de la dirección del viento, ya que otros estudios demuestran cierta correlación de la componente transversal con un aumento del centelleo. Sin embargo los resultados obtenidos muestran una escasa correlación, aún menor que la obtenida para la velocidad.

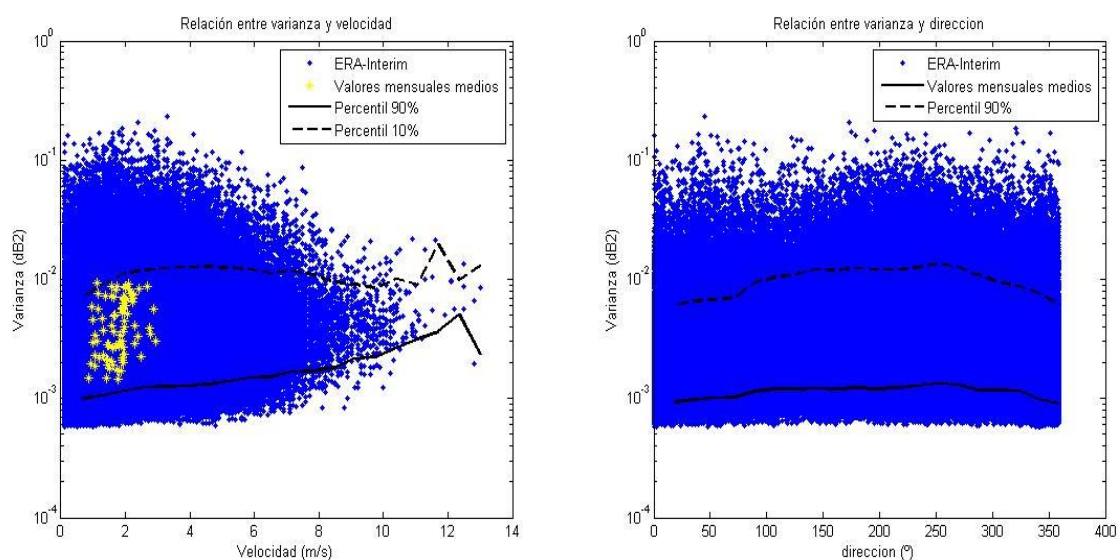


Ilustración 40. Correlación entre varianza con velocidad y dirección del viento.

Parámetros	Coefficiente de correlación
Varianza-Velocidad	0,2179

6.4.5. Vapor de agua integrado en columna vertical (TCWV, IWVC)

A continuación se estudiará la relación entre el vapor de agua integrado en columna vertical medido en dos bases de datos: ERA-Interim (TCWV) y GNSS (IWVC).

Aunque las dos bases de datos miden el mismo parámetro meteorológico, nombrado de diferente manera, los resultados obtenidos difieren para cada caso. Esto se debe al distinto modo de tomar las mediciones. Mientras que los datos recogidos por GNSS se basan en estimaciones de la cantidad de vapor de agua según el tiempo de retardo de una señal GPS, el valor de TCWV de ERA-Interim se calcula mediante modelos de predicción que tienen en cuenta mediciones de sondeos y diferentes mediciones en superficie.

En la siguiente figura se muestra la evolución del valor de agua integrado en columna vertical mensual medio. Por un lado se muestra la gráfica correspondiente a los valores tomados por GNSS y por el otro los recogidos por ERA-Interim. Ambas curvas se asemejan a la evolución de la varianza con el tiempo, aunque los valores recogidos en IWVC son más altos que en TCWV.

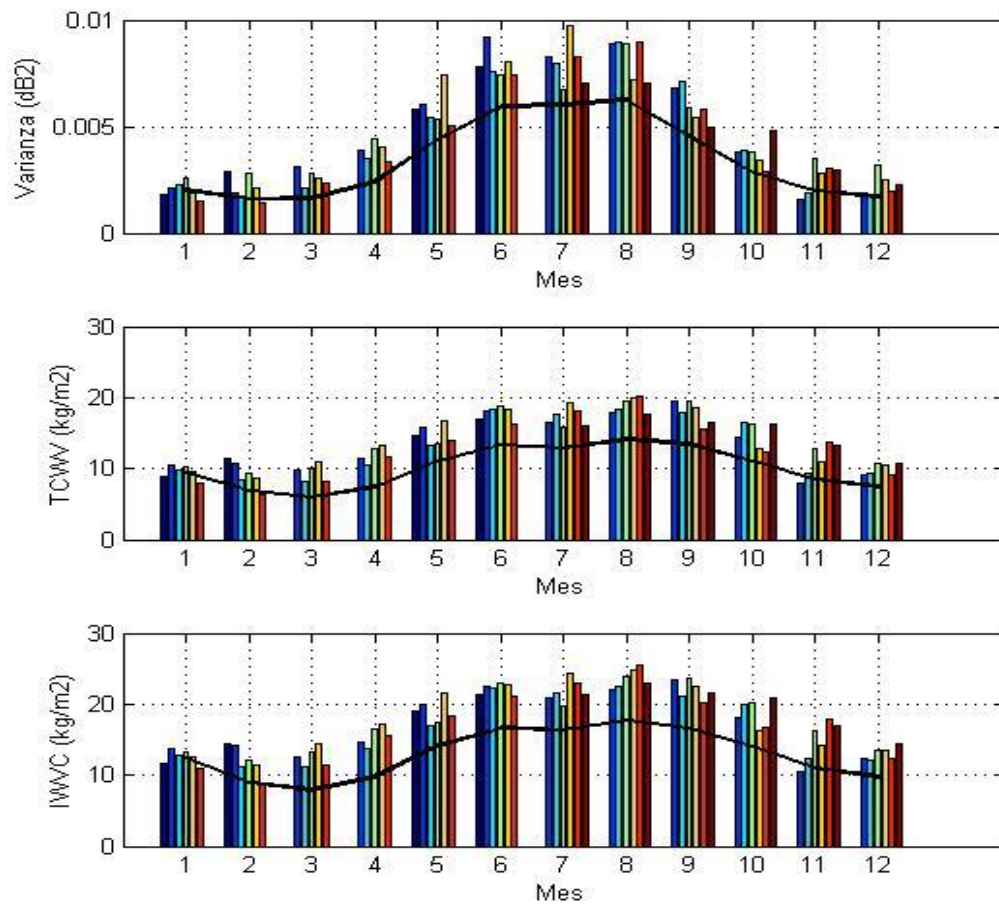


Ilustración 41. Varianza, TCWV e IWVC medias

La correlación entre la varianza y el contenido de vapor de agua en columna vertical se muestra en la figura 42. Los dos parámetros consiguen un elevado índice de correlación, aunque ligeramente superior para IWVC, siendo este de 0,5204 para este último y 0,5071 para TCWV. Estos resultados demuestran que son unos buenos indicadores de la presencia de fluctuaciones por centelleo.

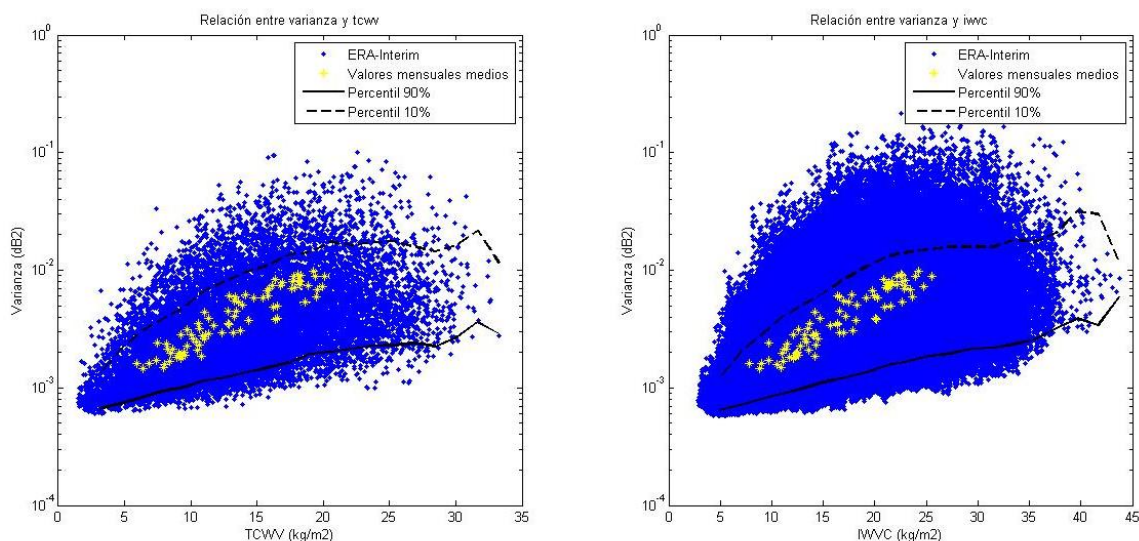


Ilustración 42. Relación entre varianza y vapor de agua integrado en columna vertical.

Parámetros	Coefficiente de correlación
Varianza-IWVC	0,5071
Varianza-TCWV	0,5204

6.4.6. Energía potencial disponible convectiva (CAPE)

La energía potencial disponible convectiva (CAPE) indica el exceso de energía debido a la diferencia de temperatura de la atmósfera con la superficie. Dado que es un parámetro que se produce a cierta altura con la superficie se ha pensado que puede ser un buen caracterizador del centelleo.

La siguiente ilustración muestra la tendencia de CAPE con el tiempo. Esta tiene muchas variaciones y no se mantiene constante para cada año de estudio. Aun así surgen ciertas similitudes entre esta y la curva de la varianza: valores mínimos para los meses de verano y un aumento de la energía convectiva a partir del mes de marzo.

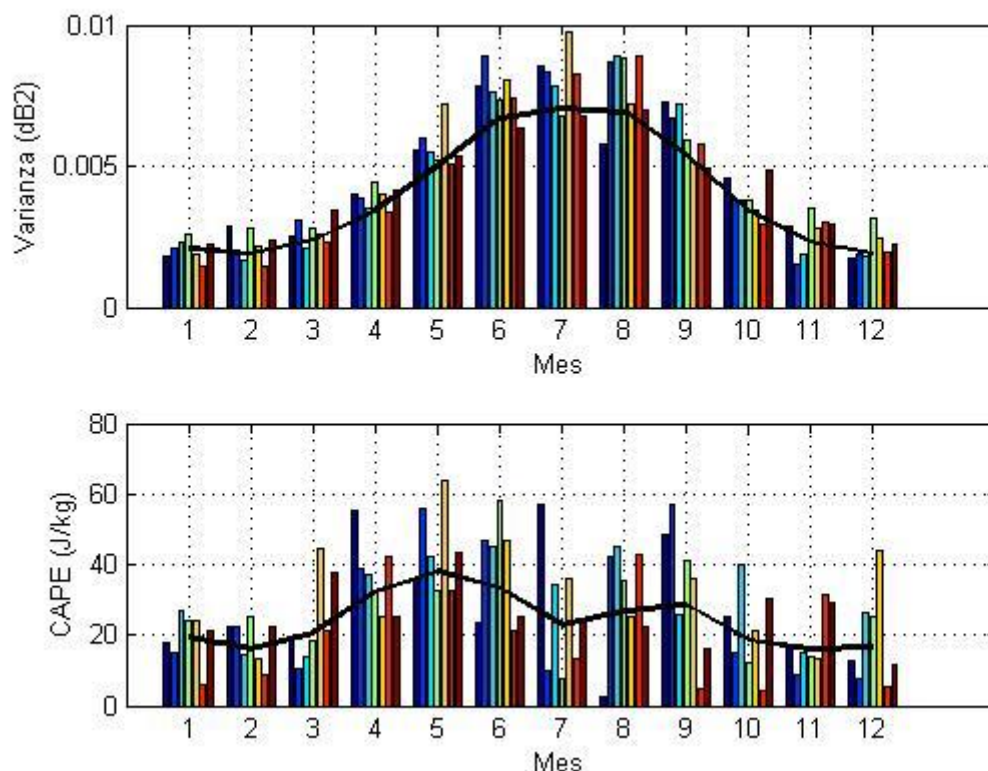


Ilustración 43. Varianza y CAPE medias.

Debido a las grandes variaciones de los valores de la energía convectiva se produce una alta dispersión de las muestras analizadas, lo que conlleva a una escasa correlación con la varianza tal y como se puede ver en la gráfica siguiente. Sin embargo los valores mensuales medios sugieren una relación más lineal con el logaritmo de la varianza, alcanzando estos valores un índice de correlación de 0,5441. Esta gran diferencia entre los índices de correlación indica que este parámetro puede resultar útil en aquellas aplicaciones que no requieran un seguimiento a tiempo real, si no unos cálculos a más largo plazo.

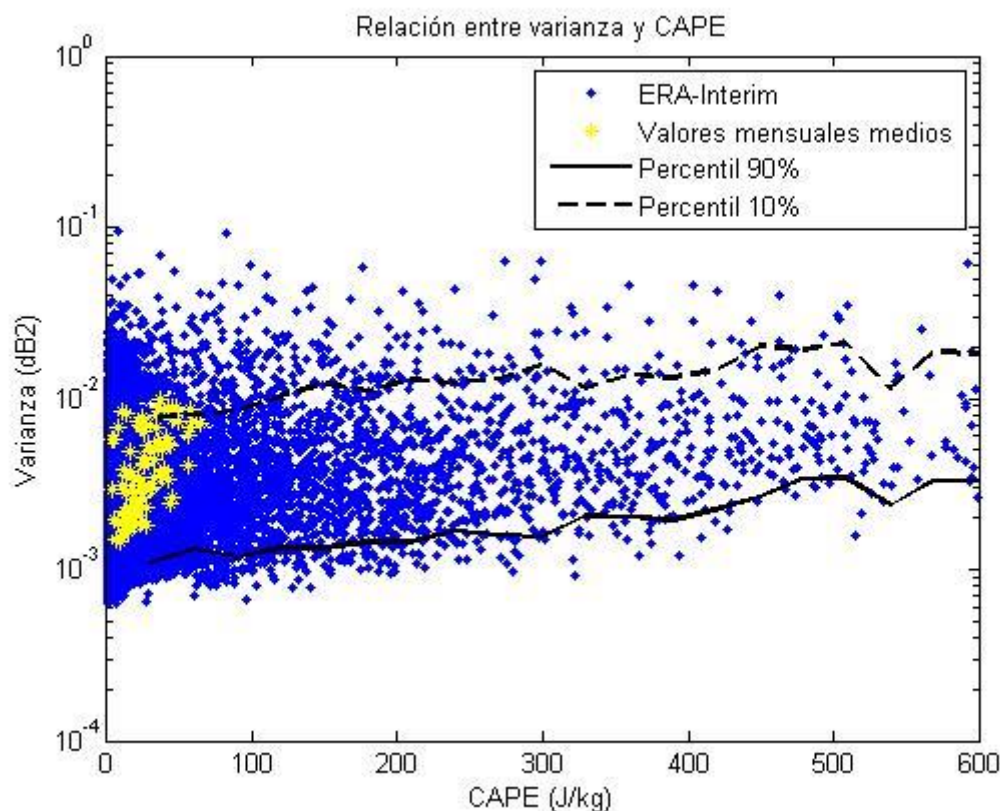


Ilustración 44. Relación entre varianza y CAPE.

Parámetros	Coefficiente de correlación
Varianza-CAPE	0,1590

6.4.7. Nubosidad

En este apartado se estudiará el efecto de la presencia de nubes en la varianza del centelleo. Se ha realizado el estudio para varios casos dependiendo del tipo de nube presente en el cielo:

- Sin nubes: No hay presencia de nubes de ningún tipo.
- Sin nubes bajas: No se observan nubes bajas pero sí medias o altas.
- Cúmulos (Cu): Nube de aspecto algodonoso que generalmente se forma entre los 500 y 6000 metros de altura. Este tipo de nube se visualiza frecuentemente durante la época de verano o con tiempo anticiclónico asociado a fenómenos convectivos.
- Cumulonimbos (Cb): Nubes de gran desarrollo vertical cuya base suele estar a menos de 2 km de altura, mientras que la superficie puede estar a más de 15 km. Se generan con mal tiempo y desencadenan tormentas. Para su formación necesitan mucha humedad y corrientes verticales de aire caliente.
- Estratos (St): Este tipo de nube se caracteriza por estar situadas en baja altitud y formar bancos de niebla.
- Estratocúmulos (Sc): nube de grandes extensiones, de masas redondeadas y en grupo. Se forman a bajas altitudes, por debajo de los 2,4 km.

- Nimbostratos (Ns): Es una nube oscura que no siempre se presenta a la misma altura, por lo que no se puede considerar estrictamente como nube de tipo bajo o medio. Suele venir acompañadas de precipitaciones continuas no intensas.
- Altoestratos (As): Son un tipo de nube caracterizada por una gran lámina sobre grandes áreas.
- Altocúmulos (Ac): Nube caracterizada por la presencia de masas globulares extendidas en una gran extensión. Sus elementos nubosos individuales son más largos y oscuros que los cirrocúmulos y más pequeños que los estratocúmulos.
- Cirrostratos (Cs): Nubes de gran altitud y extensión caracterizadas por estar compuestas de cristales de hielo. Suelen tener aspecto fibroso de color blanco.
- Cirros (Ci): Nube compuesta por cristales de hielo y caracterizado por bandas delgadas y finas. La agrupación de estas nubes forman una hoja o cirrostratos.
- Cirrocúmulos: Nube de formación alta compuesta por cristales de hielo. Aunque de aspecto son muy parecidas a los altocúmulos, los cirrocúmulos se forman a partir de cirros cuando estas se calientan suavemente desde abajo y no producen sombra.

La siguiente ilustración muestra el porcentaje total de la bóveda celeste que se encuentra cubierta por nubes en cada mes de estudio. Los meses de julio y agosto presentan un bajo porcentaje de nubes en el cielo, mientras que los meses más lluviosos e inestables presentan los valores más altos de nubosidad.

El parámetro *Total Cloud Cover* no es un indicador de centelleo por sí mismo. Hay que ver los porcentajes de aparición de cada tipo de nubes, ya que algunas tienen gran influencia y otras apenas nada, como se verá a continuación.

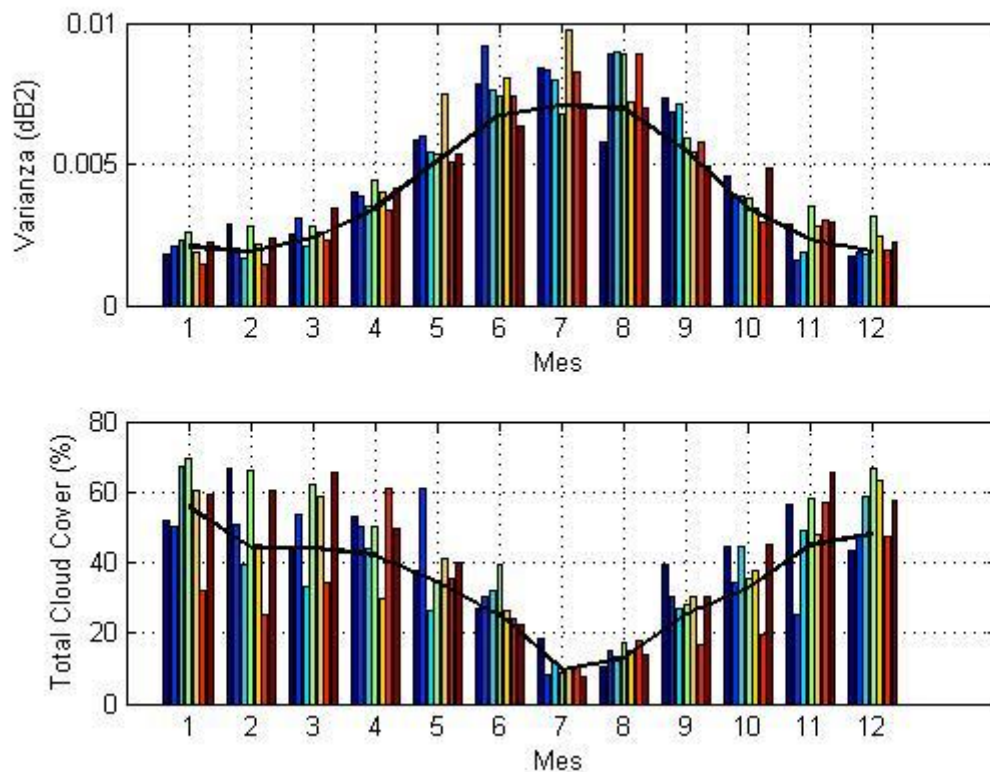


Ilustración 45. Varianza y porcentaje total de cielo cubierto medio.

Realizando un estudio de la varianza media para cada tipo de nube se puede ver la gran diferencia entre ellas para caracterizar la intensidad de centelleo. En general las nubes bajas producen un efecto más importante en la varianza, especialmente con la presencia de cúmulos y cumulonimbos. Estos dos últimos tipos de nubes consiguen un valor de varianza superior al doble comparado con la varianza media en ausencia de nubosidad. La gran cantidad de humedad en forma de minúsculas gotas de agua explica este aumento en la varianza con respecto al resto de nubes.

Respecto a las nubes medias todas tienen aproximadamente el mismo valor medio de varianza siendo mucho menor que la obtenida para los cumulonimbos. Probablemente se deba a una menor concentración de gotas de lluvia en estas nubes, predominando en su lugar cristales de hielo que producen un efecto menor sobre las fluctuaciones de la señal. Resulta conveniente hacer un comentario sobre los nimbostratos, este tipo de nube como se ha comentado anteriormente producen precipitaciones por lo que en este proyecto, al tratarse el estudio en ausencia de precipitación, su presencia es reducida. Posiblemente debido a ello las muestras analizadas de estas nubes han sido en una época temprana de su desarrollo explicando la baja varianza obtenida con este tipo de nubes.

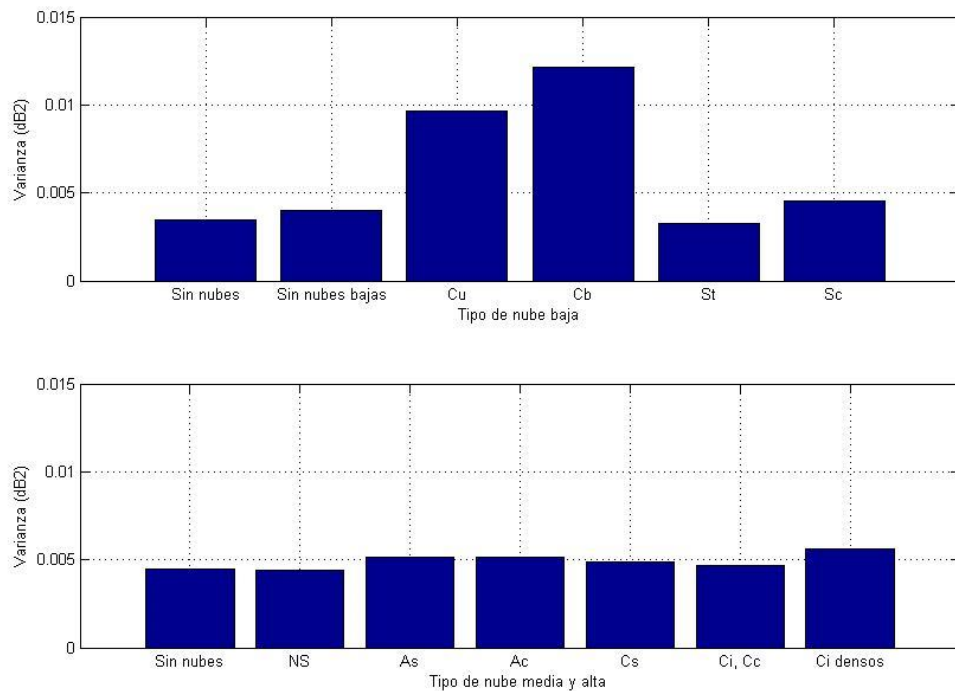


Ilustración 46. Varianza media para cada tipo de nube.

Como se puede ver en la ilustración 48 existe una alta estacionalidad con máximos en los meses de mayo a septiembre en todos los tipos de nubes. La gráfica correspondiente a cielo claro sigue claramente la tendencia seguida por la varianza media mensual, teniendo los valores máximos entre mayo y septiembre. Los factores predominantes en ausencia de nubosidad son la temperatura y la humedad, ya que el máximo se obtiene en julio tal y como ocurría con la temperatura.

En cuanto a los cúmulos y cumulonimbos estos consiguen también sus valores más altos entre los meses de mayo a septiembre, debido a una mayor presencia de estas nubes durante los meses más cálidos y estables.

Por otro lado, los nimbostratos más frecuentes en los meses de otoño e invierno mantienen un valor casi constante durante todo el año, salvo en el mes de agosto en el que se obtiene un elevado máximo. Este valor resulta sorprendentemente inusual, ya sea por su alto valor comparado con el resto de meses o por el mes en el que está situado, ya que en agosto la presencia de nimbostratos debería de ser escasa. De hecho este valor medio es el resultante de un único dato en todo el mes, por lo que no se puede sacar una conclusión clara para este evento, siendo posible que casualmente otro factor externo haya afectado al centelleo mientras se registraba esta nube.

El resto de nubes toman valores más reducidos aunque siguiendo con la misma tendencia tal y como se esperaba.

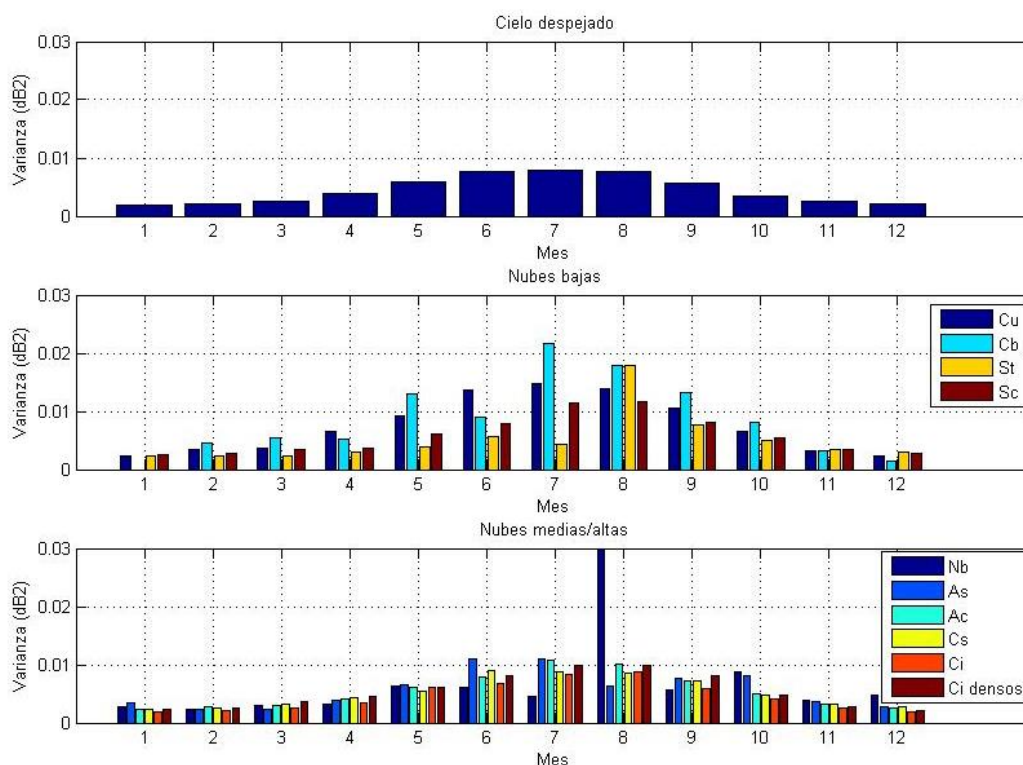


Ilustración 47. Varianza media mensual por tipo de nube.

La relación entre el número de octas con la varianza media resulta útil ya que nos indica la probabilidad de que la señal sea interceptada por una nube. El máximo valor se consigue con una octa, seguido por el valor 0 y reduciendo el valor de la varianza a medida que se aumenta el número de octas. Los cúmulos y cumulonimbos son frecuentes que hagan aparición cubriendo un bajo porcentaje de la bóveda celeste, siendo inusual que cubran más del 50% del cielo, que podría explicar la reducción del centelleo con el número de octas.

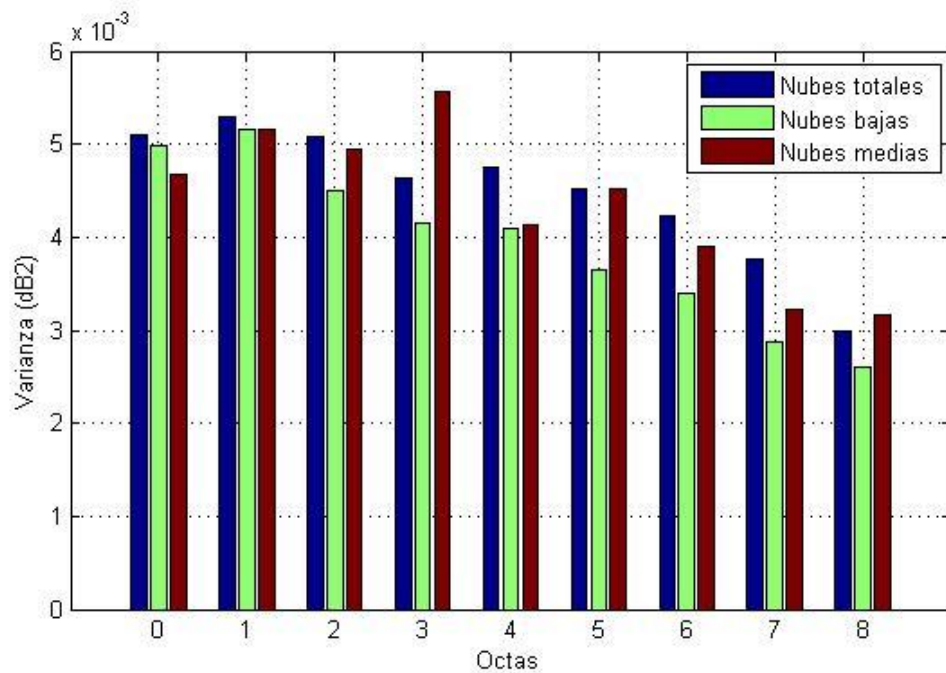


Ilustración 48. Varianza media y nubosidad medida en octas

6.5. Comparación con modelos de predicción de centelleo

A continuación se presentará la comparativa de los distintos modelos de predicción explicados en el apartado 3.6.5. Primero se mostrarán los resultados obtenidos para la estimación de la varianza mensual media. En el segundo apartado se presenta la distribución acumulada de varianza. Por último se obtienen las distribuciones acumuladas de amplitud.

6.5.1. Varianza media mensual

Todos los modelos de predicción de centelleo analizados en este proyecto calculan en primer lugar la varianza media mensual. Según el modo y los parámetros meteorológicos usados para su cálculo se pueden clasificar en distintos grupos:

- UIT-R, Karasawa y Otung: Relación lineal entre el valor medio mensual de Nwet y varianza.
- Ortgies T: Relación lineal entre el logaritmo de varianza y temperatura.
- Ortgies N: Relación lineal entre el logaritmo de varianza y Nwet.
- Marzano STH2: Relación lineal entre el logaritmo de la varianza y una ecuación cuadrática que relaciona temperatura y humedad relativa media.
- Marzano STN2: Relación lineal entre el logaritmo de la varianza y una ecuación cuadrática que relaciona temperatura y el índice de refracción húmedo Nwet.

La ilustración 49 y la tabla adjunta muestran los valores de la varianza media para cada modelo de predicción analizado.

Los dos modelos descritos por Marzano siguen una correcta evolución, con curvas muy semejantes a la experimental. Sin embargo en todo momento infravalora los resultados. Entre los dos modelos de Marzano, el que utiliza la humedad relativa

como parámetro (STH2) es con el que se consigue un comportamiento más parecido al experimental. La máxima diferencia de varianza se halla en el mes de agosto con 0,00724 dB² y la mínima en octubre, con apenas 0,0002 dB².

Los modelos que mantienen una relación lineal de la varianza con Nwet obtienen curvas con valores absolutos por encima de la curva experimental en los meses de invierno y por debajo en los meses más cálidos del año. Tanto el modelo de UIT-R como el de Otung tienen una tendencia muy parecida entre sí, aunque Otung se ajusta mejor en los meses del año ya que se obtiene la mínima diferencia en estos meses con la curva experimental si la comparamos con el resto de modelos. Por otro lado Karasawa tiene mejor comportamiento entre octubre y marzo que cualquier otro modelo a excepción del de Marzano en el mes de octubre como ya se ha comentado anteriormente.

Los dos modelos de Ortgies se alejan mucho de la curva experimental, infravalorando los resultados de la varianza en todo momento, en especial aquel que usa la temperatura como parámetro principal (Ortgies T).

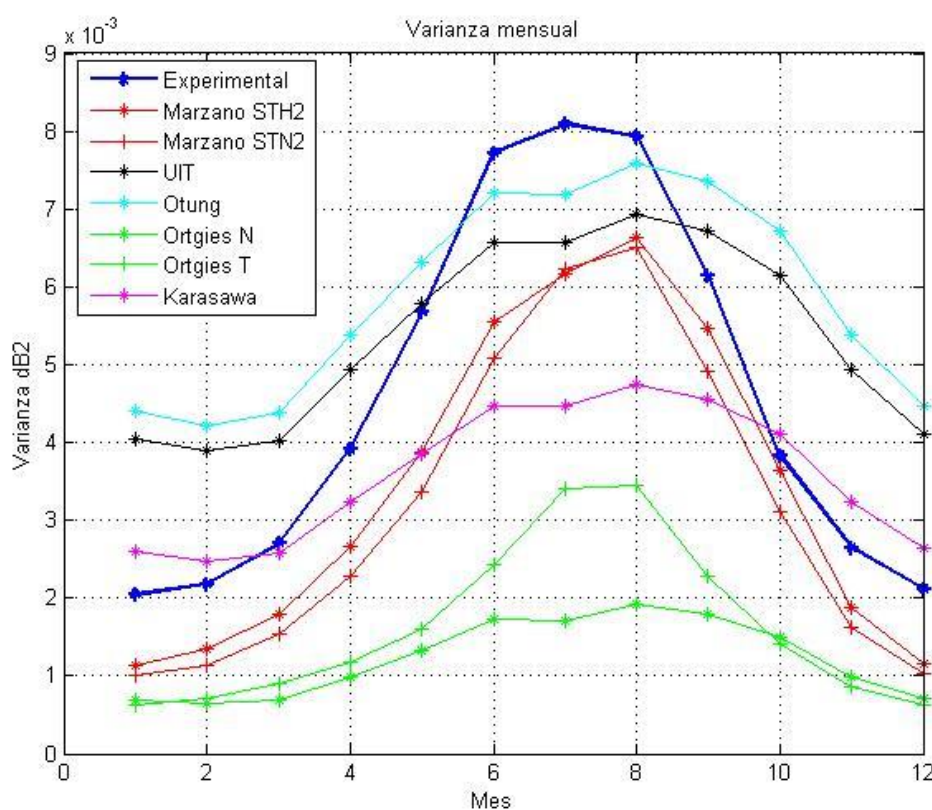


Ilustración 49. Varianza mensual media para los distintos modelos de predicción.

Mes	Experimental	Marzano STH2	Marzano STN2	UIT-R	Otung	Ortgies N	Ortgies T	Karasawa
Ene.	0,002	0,0011	0,001	0,0041	0,0044	0,0007	0,0006	0,0026
Feb.	0,0022	0,0013	0,0011	0,0039	0,0042	0,0007	0,0007	0,0025
Mar.	0,0027	0,0018	0,0015	0,004	0,0044	0,0007	0,0009	0,0026
Abr.	0,0039	0,0027	0,0023	0,0049	0,0054	0,001	0,0012	0,0032

May.	0,0057	0,0039	0,0034	0,0058	0,0063	0,0013	0,0016	0,0039
Jun.	0,0077	0,0055	0,0051	0,0066	0,0072	0,0017	0,0024	0,0045
Jul.	0,0081	0,0062	0,0062	0,0066	0,0072	0,0017	0,0034	0,0045
Ago.	0,0079	0,0066	0,0065	0,0069	0,0076	0,0019	0,0035	0,0047
Sep.	0,0061	0,0055	0,0049	0,0067	0,0073	0,0018	0,0023	0,0046
Oct.	0,0038	0,0036	0,0031	0,0061	0,0067	0,0015	0,0014	0,0041
Nov.	0,0026	0,0019	0,0016	0,0049	0,0054	0,001	0,0009	0,0032
Dic.	0,0021	0,0012	0,001	0,0041	0,0045	0,0007	0,0006	0,0026

Tabla 2. Valores de varianza mensuales medios para los distintos modelos de predicción.

6.5.2. Distribuciones acumuladas de varianza

Únicamente el modelo de Otung de todos los modelos analizados contempla la distribución acumulada de varianza. En la siguiente figura se representa esta junto a la curva experimental. Además se ha dibujado esta gráfica en el intervalo de 0,1 % del tiempo al 100%, ya que la ecuación de distribución acumulada de varianza solo es válida en este rango.

La curva seguida sigue una tendencia exponencial negativa tal y como sucede con la curva experimental, aunque la de Otung tiene una pendiente mucho más elevada. Los valores obtenidos con este modelo de predicción se alejan bastante en todo momento incluso sin alcanzar un valor nulo en el 50% del tiempo.

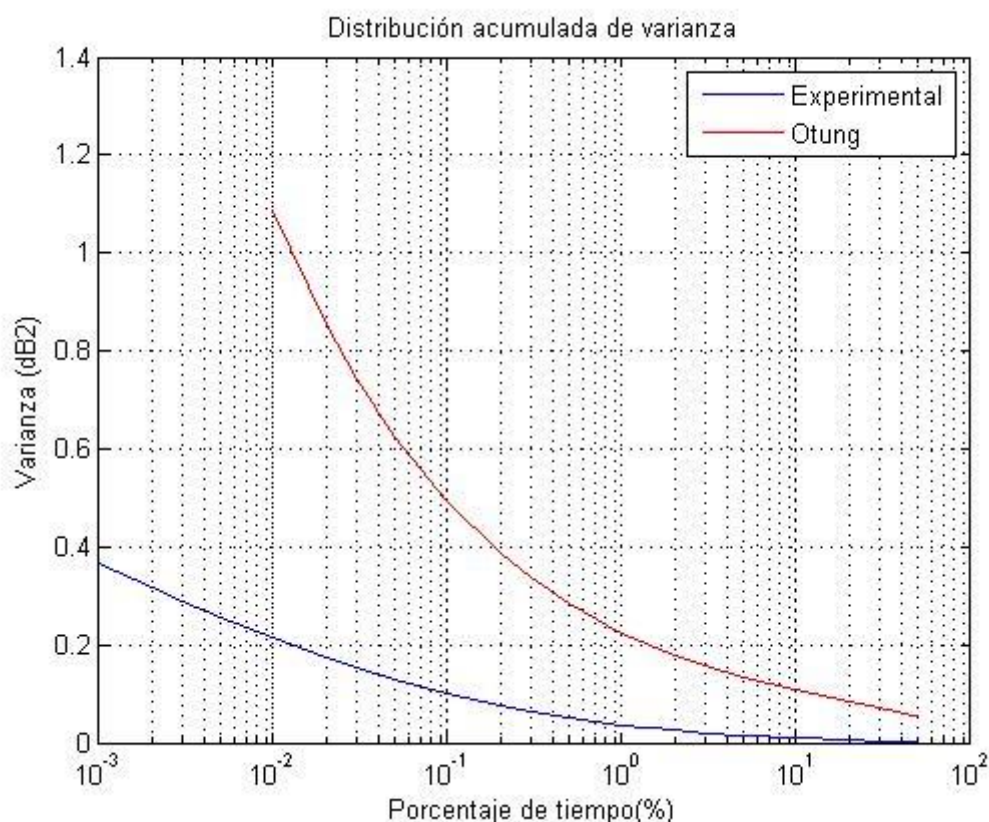


Ilustración 50. DA de varianza experimental y modelo de Otung.

6.5.3. Distribución acumulada de amplitud

Únicamente tres modelos de los analizados incluyen distribuciones acumuladas de amplitud. El modelo de Otung incluye tanto la distribución acumulada de amplitud negativa como positiva, sin embargo el modelo de Karasawa sólo hace mención a la distribución de amplitud positiva, mientras que el modelo UIT-R solo menciona la distribución acumulada negativa.

En la siguiente ilustración se ha representado la distribución acumulada de amplitud positiva de los distintos modelos mencionados anteriormente. El modelo de Otung sigue una tendencia muy parecida a la experimental, mientras que la seguida por Karasawa se aleja demasiado al comportamiento experimental, siendo excesiva su diferencia para porcentajes inferiores al 10% del tiempo. Además cabe destacar que se han representado ambos modelos en un rango de porcentajes comprendidos entre el 0,01% y el 50% del tiempo ya que este es el rango de validez de la mayoría de los modelos, incluyendo estos dos.

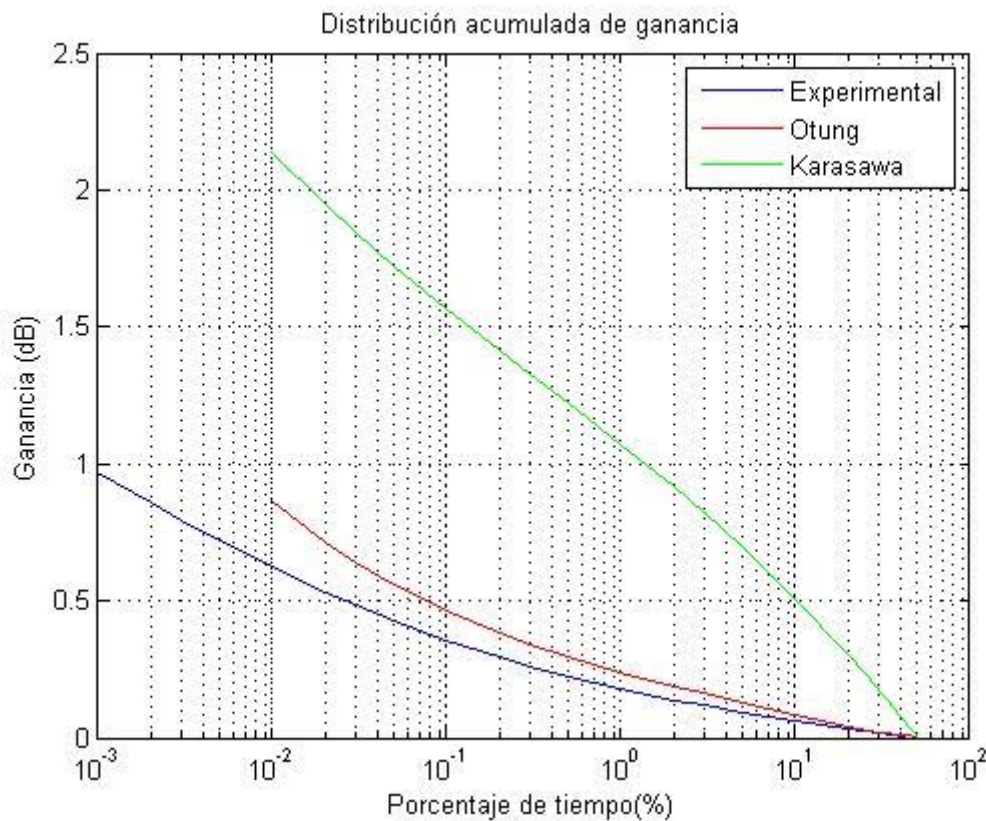


Ilustración 51. DA de ganancia experimental y para los modelos Otung y Karasawa

La ilustración 52 muestra la distribución acumulada de amplitud negativa. En este caso se ha representado los modelos de Otung y UIT-R. A diferencia de lo ocurrido con la distribución acumulada de ganancia, en la distribución acumulada de atenuación el modelo de Otung se aleja de la evolución de la curva experimental, sobrevalorando en todo momento los valores, en especial para porcentajes inferiores al 1% del tiempo. El modelo UIT-R en cambio se asemeja mejor a la curva experimental a pesar de tener una pendiente más plana.

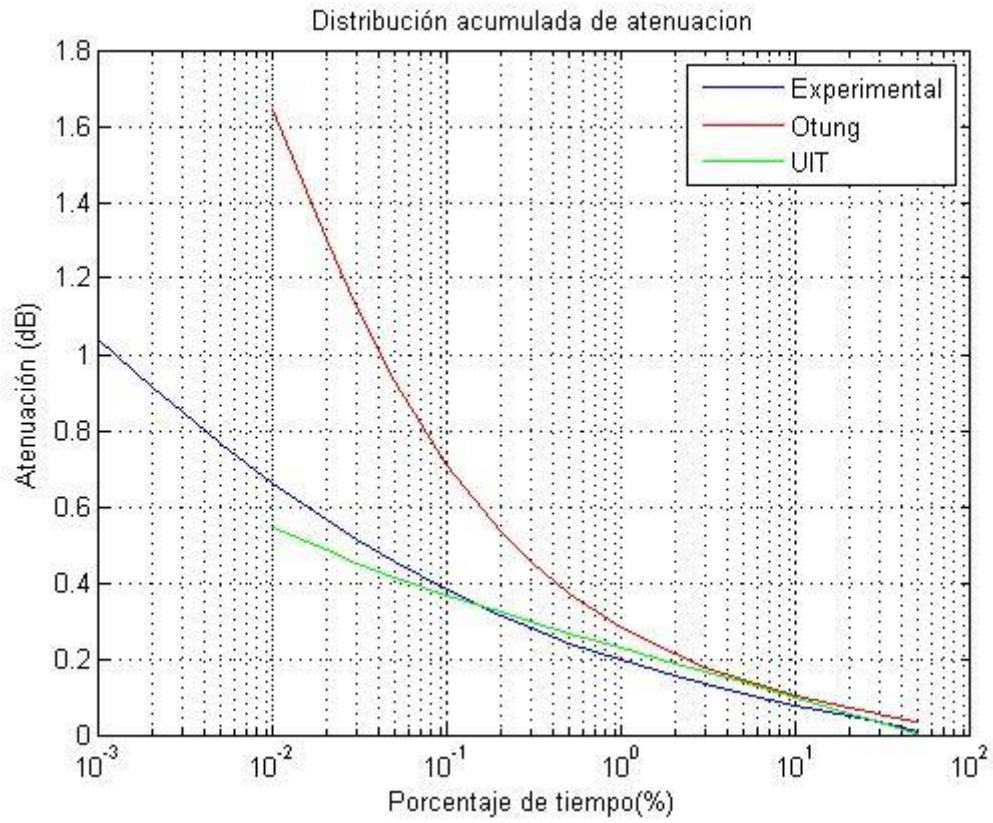


Ilustración 52. DA de atenuación experimental y para los modelos de Otung y UIT-R

Capítulo 7. Conclusiones

En este capítulo se recogen las conclusiones obtenidas del estudio del centelleo troposférico en ausencia de precipitación para los datos analizados del satélite Eutelsat Hot Bird 13A. Primero se expondrán las conclusiones extraídas en el estudio de los datos recibidos por el receptor satelital. A continuación se incluyen las conclusiones de la correlación de los parámetros meteorológicos y la comparativa con los modelos de predicción. Por último se expondrán las posibles líneas de investigación futuras.

7.1 Estudio de los datos recibidos

Del análisis de los datos recibidos por el receptor satelital se pueden destacar las siguientes conclusiones:

- Existe una gran estacionalidad en la varianza mensual, obteniéndose los mayores niveles entre los meses de verano.
- La varianza anual se mantiene casi constante a lo largo de los años de estudio, sin variaciones notables.
- Las distribuciones acumuladas muestran los niveles más altos para los meses más cálidos tal y como ocurre con la varianza mensual.
- Las mayores intensidades se dan para las fluctuaciones negativas.

7.2 Correlación de parámetros meteorológicos

En este apartado se destacan las conclusiones obtenidas tras la correlación de la varianza con los distintos parámetros meteorológicos:

- La temperatura es el parámetro que consigue una mejor correlación con la varianza.
- Los parámetros en los que interviene de alguna forma la humedad de la atmósfera (HA, Nwet, IWVC, TCWV) son buenos caracterizadores del centelleo.
- A pesar de tener un bajo índice de correlación con las muestras instantáneas, el parámetro *Convective Available Potential Energy* consigue una buena correlación con los datos mensuales medios.
- La aparición de nubes está asociada a un incremento en la intensidad de centelleo, especialmente los cúmulos y cumulonimbos debido posiblemente a la gran cantidad de vapor de agua que forman parte de ellas.
- Un aumento en el porcentaje de cielo cubierto por nubes no siempre se traduce en un aumento de la varianza. Esto se debe a que la señal se ve afectada únicamente por aquellas nubes que se interponen en su trayecto, sin ocasionar mayores inconvenientes las que se encuentran en sus proximidades.

7.3 Modelos de predicción

En este apartado se incluyen las conclusiones derivadas del cálculo de los modelos de predicción:

- El modelo de Marzano es el que mejor sigue la evolución de la curva experimental de varianza aunque infravalora en todo momento los valores. De los dos modelos descritos por Marzano el que mejor se ajusta es el modelo que usa la humedad relativa como parámetro (STH2).
- El modelo descrito por Otung para el cálculo de la DA de varianza tiene un comportamiento alejado de la curva experimental.
- En general los modelos no estiman adecuadamente las DA debido probablemente a la utilización de parámetros meteorológicos medidos en superficie, mientras que el centelleo depende principalmente de las condiciones meteorológicas sucedidas en altura.

7.4. Líneas de investigación futuras

Este experimento ha servido para caracterizar mejor el centelleo troposférico seco en banda Ka y puede ser de utilidad de cara a la implantación de técnicas FMT. Sin embargo aún se puede continuar el estudio en las siguientes líneas de investigación:

- Realizar la correlación de la varianza con parámetros meteorológicos medidos en altura como sondeos.
- Realizar un estudio detallado del centelleo húmedo, es decir, en presencia de lluvia.
- Estudiar y realizar un ajuste en los modelos de predicción para conseguir una estimación mejor de la varianza y de las distribuciones acumuladas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Allnutt J.E., "Satellite to ground radiowave propagation", 2nd ed., IET, London, UK, 2011.
- [2] COST 255 Final Report, "Radiowave propagation modelling for new satellite communication services at Ku-band and above". Cost Action Report, 2002.
- [3] Paraboni A., Martelucci A., Riva C., "Research on tropospheric propagation modeling in satellite radio links". Antennas and Propagation, 2007. Proc. Of Eucap 2007, Edinburgh, UK, 2007.
- [4] García del Pino, P. "Caracterización experimental de la propagación a 50 GHz en trayecto inclinado". Tesis Doctoral, ETSIT UPM, Madrid, 2003.
- [5] Sepúlveda Campos, J. "Análisis de Resultados Experimentales de Propagación en Trayecto Inclinado en Banda Ka" Proyecto fin de Carrera, ETSIT UPM, Madrid, 2013.
- [6] Martín Tomero, P. "Estudio experimental de la propagación con un receptor de satélite en banda Ka con un radiómetro integrado", Proyecto fin de Carrera, ETSIT UPM, Madrid, 2009.
- [7] Peña Torres, A. "Síntesis de series temporales de atenuación troposférica en banda Ka", Proyecto fin de Carrera, ETSIT UPM, Madrid, 2013.
- [8] Hernando Rábanos, J.M., Riera Salís, J.M., Mendo Tomás, L., "Transmisión por Radio", Editorial universitaria Ramón Areces, 7a edición, Madrid 2013
- [9] ITU-R, Recommendation P.676-9, "Attenuation by atmospheric gases", Geneva, Switzerland 2012..
- [10] Hernando Rábanos, J.M., Riera Salís, J.M., Mendo Tomás, L., "Transmisión por Radio", Editorial universitaria Ramón Areces, 7a edición, Madrid 2013.
- [11] UIT-R, Recomendación P.840-3, "Atenuación debida a las nubes y a la niebla", 1999.
- [12] Dissanayake A., Allnutt J., and Haidara F., "A prediction model that combines rain attenuation and other propagation impairments along earth-satellite paths", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 45, no.10, pp. 1546-1558, 1997.
- [13] Salonen E., Karhu, S. and Hyvonen, R., "Study of improved propagation predictions", ESA/ESTEC Contract 9455/91/NL/LC(SC), Final Report, 1994.
- [14] J.O. Laws y D.A. parsons, "The relation of raindrop size intensity", Trans. Amer. Geophys. Union, vol.24, 1943.

- [15] J. Joss, J.C. Thams y A. Waldvogel, "The Variation of Raindrop Size Distributions at Locarno", Proc. Int. Conf. on Clouds Physics, Toronto, 1968.
- [16] H.R. Pruppacher y R.L. Pitter, "A semi-empirical determination of the shape of cloud and raindrops", Journal of Atmospheric Science, vol. 28, 1971.
- [17] G. Brussaard, "A Meteorological Model for Rain Induced Cross-Polarisation", IEEE trans. Antennas Propag., vol.24, 1976.
- [18] K.L.S. Gunn y G.D. Kinzer, "The Terminal Velocity of Fall for Water Droplets in Stagnant Air", J. Meteorol., vol. 6, 1949.
- [19] ITU-R Recommendation P.618-11, "Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems", Geneva, Switzerland, ITU, 2013.
- [20] Capsoni C., Fedi F., Magistroni C., Pawlina A. and Paraboni A., "Data and theory for a new model of the horizontal structure of rain cells for propagation applications", Radio Science, Vol. 22, No. 3, pp. 395-404, March-April 1987.
- [21] Stutzman W.L., Dishman W.K., "A simple model for the estimation of rain-induced attenuation along earth-space paths at millimeter wavelengths", Radio Science, Vol. 19, 3, May-June 1984, p. 946 (Corrections and reference to the original paper of 1982).
- [22] V.I. Tatarski, "Wave Propagation in a Turbulent Medium", Ed. McGraw Hill, Nueva York, EEUU, 1961.
- [23] J. Haddon y E. Vilar, "Scattering Induced Microwave Scintillations from Clear Air and Rain on Earth Space Paths and the Influence of Antenna Aperture", IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 34, n.5, mayo 1986.
- [24] T.J. Mouldsley y E. Vilar, "Experimental and Theoretical Statics of Microwave Amplitude Scintillations on Satellite Down-Links", IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 30, n.6, pp. 1099-1106, noviembre 1982.
- [25] Banjo P., Vilar E., "The dependence of slant path amplitude scintillations on various meteorological parameters" Actas de Icap 1987.
- [26] M. van de Kamp, " Asymmetric signal level distribution due to tropospheric scintillation", Electronics Letters, vol.34, n.11, mayo 1998.
- [27] Y. Karasawa, M. Yamada y J.E. Allnutt, " A New Prediction Method for Tropospheric Scintillation on Earth-Space Paths", IEEE Trans. Antennas Propagat, vol. 36, n. 11, 1608-1614, noviembre 1988.

- [28] UIT-R, Recomendación P.838-3, "Modelo de la atenuación específica debida a la lluvia para los métodos de predicción", Ginebra, Suiza, 2003.
- [29] COST 280, "Propagation Impairment Mitigation for Millimetre Wave Radio Systems". Cost Action Review, noviembre 2002.
- [30] Crane, R.K., Blood, D.W., "Handbook for the estimation of microwave propagation effects", NASA Contract NAS5-25341, NASA GSFC Greenbelt, MA, Technical Report n. 1, Doc. 7376-TR1, 1979.
- [31] Crane R.K. "Prediction of attenuation by rain", IEEE Transaction on Communications, COM-28, 9, pp. 1717-1733, September 1980.
- [32] Otung I.E., "Prediction of tropospheric amplitude scintillation on a satellite link", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 44, No. 12, pp. 1600-1608, 1996.
- [33] Ortgies G., "Prediction of slant-path amplitude scintillation from meteorological parameters", Proc. Int. Symp. Radio Propagation, Beijing, pp. 218-221, 1993.
- [34] Peeters G., Marzano F.S., D. Auria G., Riva C., Vanhoenacker D., "Evaluation of statistical models for clear-air scintillation prediction using Olympus satellite measurements", International Journal of Satellite Communications, Vol. 15, pp 73-88, 1997.
- [35] I.E. Otung y M.S. Mahmoud, "Rain-induced scintillation on satellite downlinks", Electronics Letters, ol.32, n.1, enero 1996.
- [36] Matricciani E., Mauri M., Riva C., "Relationship between scintillation and rain attenuation at 19,77 GHz", Radio Science. Vol. 31, No. 2, pp 273-279, 1996.
- [37] D.Mertens y D. Vanhoenacker-Janvier, "Rain fade dependence model of long-term scintillation amplitude distribution at 12.5 GHz", Electronics Letters, vol. 37, n. 10, pp 657-658, mayo 2001.
- [38] Dissanayake A., Allnutt J., and Haidara F., "A prediction model that combines rain attenuation and other propagation impairments along earth-satellite paths", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 45, no.10, pp. 1546-1558, 1997.
- [39] Castanet L., Lemorton J., Konefal T., Shukla A.K., Watson P.A., Wrench C.L., "Comparison of various methods for combining propagation effects and predicting loss in lowavailability systems in the 20 GHz to 50 GHz frequency range", International Journal of Satellite Communications, Vol 19, no. 3, pp 317-334, May-June 2001.
- [40] ITU-R, Recommendation P.1623-1, "Prediction method of fade dynamics on Earth-space paths", Geneva, Switzerland, 2005.